



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사학위논문

고속도로 진출입 램프 지체·혼잡
경계 속도 추정 및 혼잡원인 분석

Estimation of Delay and Congestion
Threshold Speed in Highway Lamps and
Cause Analysis of Congestion

2020년 8월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 교통학전공
양 태 양

고속도로 진출입 램프 지체·혼잡 경계 속도 추정 및 혼잡원인 분석

지도교수 이 영 인

이 논문을 도시계획학 석사 학위논문으로 제출함
2020년 6월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 교통학전공
양 태 양

양태양의 도시계획학 석사 학위논문을 인준함
2020년 6월

위 원 장 _____ (인)

부 위 원 장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

고속도로 본선부의 혼잡은 진출입 램프의 병목현상이 주요 원인으로 지목되고 있다. 혼잡 해소를 위해서는 진출입 램프에 대한 혼잡 관리가 필요하지만, 소통상황을 판단할 명확한 근거가 부족하다. 본선부의 경우 제한속도나 도로 선형 등 속성이 유사하기 때문에, 일괄적인 기준을 적용하여도 큰 문제가 안되지만, 진출입 램프의 경우 다양한 속성을 가지고 있어 일괄적인 기준을 적용하기 어렵다. 따라서 본 연구의 목적은 전국 고속도로 진출입 램프를 구성하고 있는 개별 링크를 상하행, 진출입 등으로 경로로 구분하여, 혼잡 관리를 위한 지체·혼잡 경계 속도를 도출하는 것에 있다.

혼잡과 지체를 판단하는데 지표를 활용하는 방법과 서로 다른 교통류를 클러스터링 기법 등을 통하여 분류해내는 방법이 있다. 본 연구에서는 가우시안 혼합 모형을 활용하여 혼잡, 지체, 원활 3가지 군집으로 분류하였다. 기존의 가우시안 혼합 모형에 관련된 연구에서 한계점으로 연구자에 의해 정해지는 군집의 수로 인하여 설명력이 떨어질 수 있는 한계가 있다고 제시하고 있었다. 본 연구에서는 BIC를 활용하여 가장 최적의 군집수를 찾아 모형을 도출하였다. 군집수의 범위는 예비분석을 통하여 평일은 1 ~ 7개, 주말은 1 ~ 6개로 설정하여 적용하였다.

여러 개의 가우시안 분포에 대하여 혼잡과 지체, 원활을 나누게 되는 절대적인 기준은 TPI를 활용하였다. TPI는 자유속도 대비 현재의 평균통행속도가 어느 정도 수준인지 계산하여 TPI 값 0.4 보다 작은 경우 원활, 0.7 보다 큰 경우 혼잡으로 구분할 수 있는 지표이다.

TPI 값으로 3가지 소통상황으로 군집을 나누게 되면 1개의 소통상황 안에 여러 개의 군집이 있을 경우 어떤 군집이 소통상황을 대표하는 군집이라고 할 수 있는가에 대한 문제가 발생한다. 본 연구에서는 각 모형

의 혼합계수를 활용하여 하나의 모형으로 합하였다.

본 연구에서의 경계 속도는 각 소통상황을 대표하는 군집의 교차점이며, 통행속도 분포가 다르게 나타나는 평일과 주말을 구분한다. 혼잡과 지체, 혼잡과 원활 군집이 교차하는 교차점의 경우 혼잡 경계 속도로 정의하며, 지체와 원활 군집이 교차하는 교차점의 경우 지체 경계 속도로 정의한다. 적용 결과 혼잡 경계 속도는 평일 252개, 주말 210개 경로에 대하여 도출하였으며, 지체 경계 속도는 평일 982개, 주말 910개 경로에 대하여 도출하였다.

평일과 주말 462개 혼잡 경계 속도 중 평일과 주말 모두 혼잡 경계 속도가 도출된 경로는 145개 경로로, 평일과 주말이 혼잡한 곳이 다른 경우가 많은 것으로 나타났다. 지체 경계 속도의 경우 1,892개 중 중복되는 경로는 742개로 혼잡 경계 속도와 비교해 평일과 주말에서 큰 차이를 보이지 않았다.

도출한 지체·혼잡 경계 속도를 적용하여 혼잡원인을 사례분석을 통해 알아보았다. 진출 경로의 경우 접속되는 교차로가 혼잡의 원인이 되는 사례가 있었고, 진입 경로의 경우 본선부의 혼잡이 진출입 램프까지 이어지게 되는 사례도 볼 수 있다.

본 연구에서는 고속도로 본선부 혼잡의 원인으로 지목되고 있는 진출입 램프에 대하여 소통상황을 판단할 수 있는 지체·혼잡 경계 속도를 도출하였다는 것에 의의를 가진다. 하지만 데이터 구득의 한계로 인하여 개별 차량 데이터가 아닌 5분 단위 평균 통행속도 자료를 활용한 점과 지체, 혼잡이 발생하지 않은 경로에 대해서는 기준을 제시할 수 없다는 것을 한계점으로 남긴다.

주요어 : 진출입 램프, 교통혼잡, 경계속도, 혼잡원인 분석, 군집화

학 번 : 2018-28701

<목 차>

I. 서론	1
1. 연구 배경 및 목적	1
2. 연구의 범위	2
1) 공간적 범위 : 전국 고속도로 진출입 램프	2
2) 시간적 범위 : 2018년 10월	2
3. 연구의 방법	2
II. 선행연구의 고찰	4
1. 혼잡 관련 분석 및 지표	4
1) 클러스터링을 활용한 혼잡판단	4
2) 혼잡 지표를 활용한 혼잡판단	8
2. 혼잡전이 및 원인 분석	11
3. 시사점	13
III. 연구 방법론	14
1. 연구 방법론의 개요	14
2. 가우시안 혼합 모형	16
3. 지체·혼잡 경계 속도 도출	19
1) 군집별 소통상황 분류	22
2) 소통상황별 군집화	25

IV. 적용	28
1. 분석범위 설정 및 데이터	28
1) 분석범위 설정	28
2) 표준노드링크체계	30
3) 고속도로 진출입 램프 번호체계	33
4) 국가교통통합분석시스템	35
2. 지체·혼잡 경계 속도 도출	37
1) 혼잡 경계 속도 도출 결과	42
2) 지체 경계 속도 도출 결과	52
3. 혼잡원인 분석	61
1) 혼잡 링크 표출	61
2) 혼잡원인 사례분석	62
V. 결론	70
1. 연구의 시사점 및 한계점	70
1) 연구의 시사점	70
2) 연구의 한계점	70
2. 연구의 활용방안	71
3. 향후 과제	71
■ 참고문헌	72
Abstract	75

<표 차례>

<표 1> 클러스터링을 활용한 혼잡판단	7
<표 2> 혼잡 지표를 활용한 혼잡판단	10
<표 3> 혼잡원인 분석	12
<표 4> 최대 군집수 예비분석	19
<표 5> 교통 소통상황 판단기준 검토	24
<표 6> 표준링크 자료	30
<표 7> 표준노드 자료	31
<표 8> 번호체계 자료	33
<표 9> 국가교통통합분석시스템 자료	35
<표 10> 경로별 링크 클러스터링	40
<표 11> 경로별 제한속도	41
<표 12> 가우시안 혼합 모형 적용 결과	41
<표 13> 평일, 주말 군집별 기초통계량 - 혼잡 경계 속도	42
<표 14> 평일, 주말 혼잡 경계 속도 기초통계량	43
<표 15> 교차점별 혼잡 경계 속도 기초통계량	44
<표 16> 평일, 주말, 중복 혼잡 경계 속도 기초통계량	45
<표 17> 평일, 주말 혼잡 경로 인구밀도	46
<표 18> 권역별 평일, 주말 혼잡 경로 분석	47
<표 19> 권역별 평일, 주말 혼잡 경로 비율 분석	47
<표 20> 평일 경로별 혼잡 경계 속도	48
<표 21> 번호체계 활용 평일 경로별 혼잡 경계 속도	49
<표 22> 주말 경로별 혼잡 경계 속도	50
<표 23> 번호체계 활용 주말 경로별 혼잡 경계 속도	51

<표 24> 평일, 주말 군집별 기초통계량 - 지체 경계 속도	52
<표 25> 평일, 주말 지체 경계 속도 기초통계량	53
<표 26> 평일, 주말, 중복 지체 경계 속도 기초통계량	54
<표 27> 평일, 주말 지체 경로 인구밀도	55
<표 28> 권역별 평일, 주말 지체 경로 분석	56
<표 29> 권역별 평일, 주말 지체 경로 비율 분석	56
<표 30> 평일 경로별 지체 경계 속도	57
<표 31> 번호체계 활용 평일 경로별 지체 경계 속도	58
<표 32> 주말 경로별 지체 경계 속도	59
<표 33> 번호체계 활용 주말 경로별 지체 경계 속도	60
<표 34> 남구미 IC 상행 진출 혼잡원인 분석	63
<표 35> 남안산 IC 하행 진입 혼잡원인 분석	65
<표 36> 구미 IC 하행 진출 혼잡원인 분석	67
<표 37> 창녕 IC 상행 진출 혼잡원인 분석	69

〈그림 차례〉

<그림 1> 연구의 흐름도	3
<그림 2> 통행속도 원활, 혼잡의 군집 현상	14
<그림 3> 소통상황 판단 방법	15
<그림 4> 가우시안 혼합 모형	18
<그림 5> 가우시안 혼합 모형 군집 분류 - 발안 IC 상행 진입	20
<그림 6> 경계 속도 도출	21
<그림 7> 원활한 두 군집 분류	22
<그림 8> 군집별 소통상황 분류 - 발안 IC 상행 진입	24
<그림 9> 군집 간의 교차점 - 발안 IC 상행 진입	25
<그림 10> 소통상황별 군집화 - 발안 IC 상행 진입	26
<그림 11> 지체·혼잡 경계 속도 도출 - 발안 IC 상행 진입	27
<그림 12> 혼잡 경계 속도 도출 - 목천 IC 상행 진출	27
<그림 13> 경로 단위 연구 분석범위	28
<그림 14> 표준링크의 분할점 - 수성 IC	32
<그림 15> 진출입 번호 예시 - 서초 IC	34
<그림 16> 링크 속성정보별 통행속도 분포	36
<그림 17> 평일, 주말 통행속도 패턴 비교	37
<그림 18> 첨두, 비첨두 통행속도 가우시안 분포	38
<그림 19> 1시간 단위 통행속도 가우시안 분포	39
<그림 20> 분산 값에 따른 교차점	44
<그림 21> 평일, 주말 혼잡 경로 분석	46
<그림 22> 평일, 주말 지체 경로 분석	55
<그림 23> 지체·혼잡 링크 표출	61

<그림 24> 남구미 IC 상행 진출 혼잡원인 분석	62
<그림 25> 남안산 IC 하행 진입 혼잡원인 분석	64
<그림 26> 구미 IC 하행 진출 혼잡원인 분석	66
<그림 27> 창녕 IC 상행 진출 혼잡원인 분석	68

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

자동차 등록대수 증가와 소득수준 향상으로 인한 여가활동 증가로 자동차 통행량이 증가하고 있다. 국토교통부(2018)에 따르면 고속도로 차량 이용 현황의 경우 2010년 1,377,062천대, 2018년 1,771,960천대로 연평균 3.2%씩 증가하였다. 이에 비해 고속도로 연장은 2010년 3,860km에서 2018년 4,767km로 연평균 2.7%씩 증가하였다. 고속도로 연장 증가대비 차량 이용이 더 크게 증가하여 교통혼잡비용 역시 매해 증가하고 있다.

이러한 문제점을 해소하기 위하여 고속도로의 경우 교통혼잡을 개선하기 위한 연구와 교통혼잡 개선 계획 등 다양한 노력들이 있어왔다. 그 예로 한국도로공사에서는 2007년부터 3년 단위로 총 4차에 걸친 혼잡 개선 계획을 수립하여 시행하고 있다. 어느 정도 효과를 보인 구간도 있지만 대부분 본선부에 집중되어 있다. 이외의 다수의 교통혼잡은 하위도로 또는 다른 노선으로 연결되는 진출입 램프에서 발생하고 있다. 본선부 혼잡은 진출입 램프의 병목현상이 주요 원인으로 지목되고 있어, 혼잡을 해소하기 위해서는 진출입 램프에 대한 연구가 필요하다.

고속도로 본선부의 경우 100km/h ~ 110km/h의 유사한 제한속도를 갖지만, 진출입 램프의 경우 30km/h에서 60km/h로 다양하다. 본선부의 경우 현재 한국도로공사에서 적용중인 40km/h의 혼잡기준을 일괄적으로 적용하더라도 제한속도가 유사한 특성 때문에 문제가 되지 않지만, 진출입 램프의 경우 제한속도가 60km/h인 링크와 30km/h인 링크에 대하여 같은 기준을 적용하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 고속도로 혼잡의 주요 원인인 진출입 램프에 대해서 표준링크 단위로 소통상황을 명확하게 판단하기 위한 지체·혼잡 경계 속도를 도출하고자 한다. 또한, 지체·혼잡 경계 속도를 이용하여 소통상황을 판단한 뒤 혼잡이 전파되는 행태를 파악하여 혼잡원인을 분석하고자 한다.

2. 연구의 범위

1) 공간적 범위 : 전국 고속도로 진출입 램프

본 연구에서는 전국 고속도로 진출입 램프에 대하여 지체·혼잡 경계 속도를 도출하고자 한다. 여기서 고속도로의 진출입 램프 중 진입 램프는 하위도로 ~ 영업소 ~ 가속차로가 끝나는 지점으로 정의한다. 진출 램프는 감속차로 시작 지점 ~ 영업소 ~ 하위도로가 시작되는 지점으로 정의한다. 이를 구성하고 구분할 링크와 노드의 기준은 국토교통부에서 배포하고 있는 표준노드링크를 기반으로 분석한다.

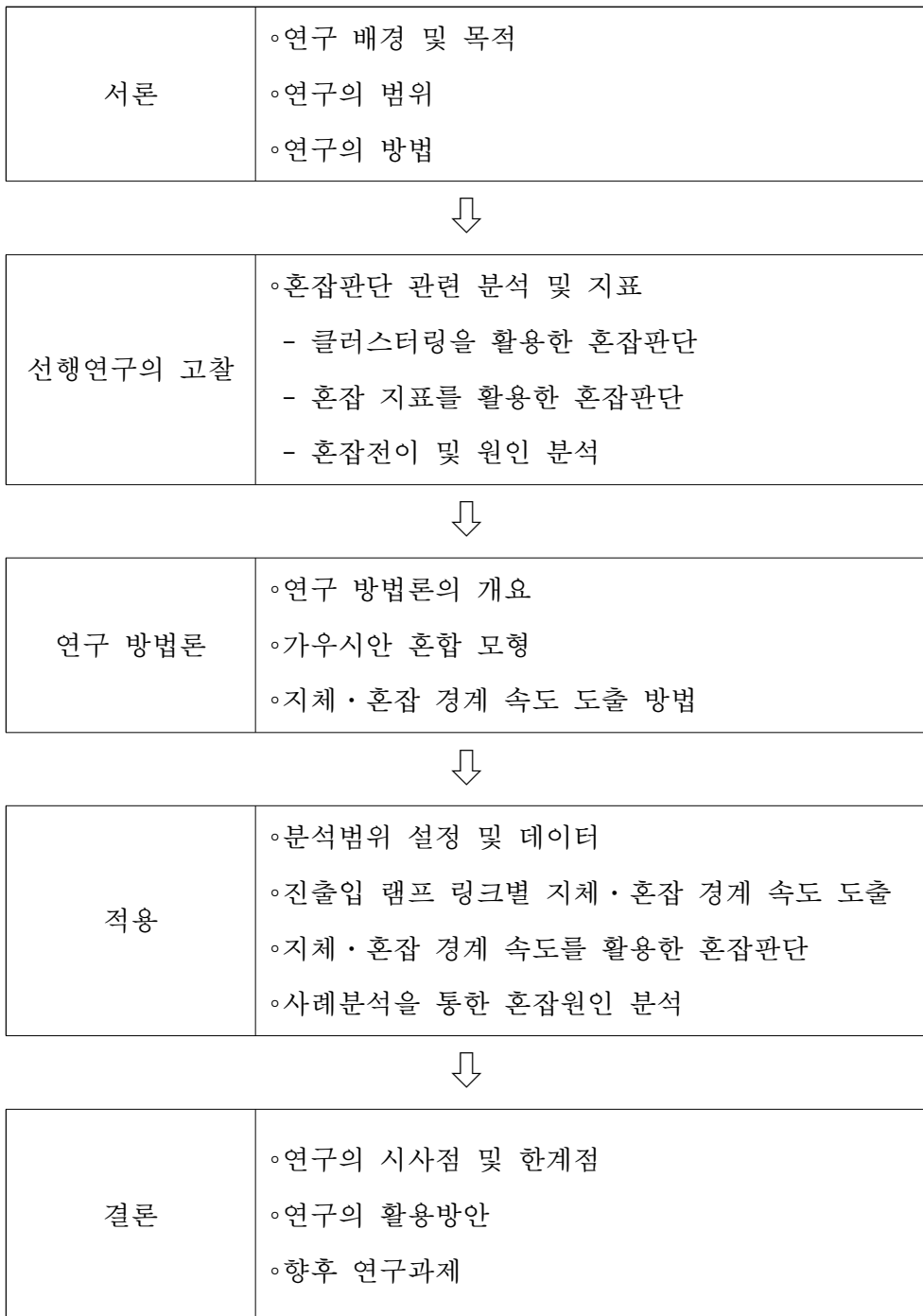
2) 시간적 범위 : 2018년 10월

본 연구는 2018년 10월 한 달을 기준으로 분석하고자 한다. 국가교통 통합분석시스템을 통하여 수집한 데이터의 기간이 위와 같은 기간에 해당된다. 10월은 교통량 조사의 기준이 되는 달로 특별한 이벤트가 없어 교통조사의 표준이 되는 달이다. 따라서 본 연구에서는 2018년 10월을 대상으로 분석하고자 한다.

3. 연구의 방법

본 연구에서는 2018년 10월 링크 단위의 5분 단위 통행속도 자료를 이용하여 지체·혼잡 경계 속도를 도출하고자 한다. 지체·혼잡 경계 속도 도출에는 가우시안 혼합 모형을 활용한다. 평일과 주말의 통행패턴이 다르기 때문에 개별 진출입 램프 경로 단위로 평일과 주말 2가지 지체·혼잡 경계 속도를 도출한다. 도출된 지체·혼잡 경계 속도를 이용하여 링크 단위의 혼잡을 판단하여 어떠한 링크로 인하여 혼잡이 발생하는지 분석하고자 한다.

<그림 1> 연구의 흐름도



II. 선행연구의 고찰

1. 혼잡 관련 분석 및 지표

과거 혼잡 관련 연구에서는 혼잡을 어떠한 방법으로 판단해서 분석하였는지 파악하고자 혼잡과 관련된 선행연구를 고찰하였다. 보다 과거의 연구에서는 주로 지표를 활용하여 혼잡을 판단했으며, 현재에 가까워지면서 다양한 머신러닝을 활용한 클러스터링 기법들이 개발되어 이를 활용한 혼잡판단 기법들이 연구되고 있다. 이에 본 연구에서는 혼잡과 관련된 연구는 크게 클러스터링 기법을 활용하여 혼잡을 판단하는 연구와 속도나 밀도 등의 지표를 활용하여 혼잡을 판단하는 연구로 나누어 고찰하였다. 본 연구에서의 목표인 지체·혼잡 경계 속도를 합리적으로 도출하기 위하여 과거의 연구에서는 어떠한 지표들을 사용하였는지, 클러스터링을 활용한 기법에는 어떠한 기법들이 존재하며 장단점은 어떠한지 선행연구를 통해 살펴보았다.

1) 클러스터링을 활용한 혼잡판단

Ko & Guensler(2005)에서는 혼잡은 어떠한 특정한 방법으로만 판단하거나 정의할 수 없으며 다양한 유형의 혼잡이 존재하기 때문에 혼잡을 판단하기 위해서 다양한 접근이 계속해서 필요하다고 하였다. 이에 논문에서는 다양한 상황에서도 적용이 가능한 가우시안 혼합 모형을 활용하여 혼잡을 특정 짓고자 하였다. 이러한 접근은 특정 동안의 속도 분포가 혼잡한 분포와 혼잡하지 않은 분포가 혼합되어 있다는 가정과 모두 정규 분포(가우시안 분포)를 따른다는 가정에서 시작한다. 여기서 가우시안 혼합 모형을 구성하는 집단의 수는 혼잡과 원활 2가지로 구분하였다. 미국 조지아주 애틀랜타에 있는 주간고속도로 제75호선을 따라 4개 지점에서

수집된 평일 5일간의 15분 단위 평균 통행속도 자료를 분석에 활용하였다. 가우시안 혼합 모형을 통하여 도출된 평균, 분산, 가중치를 통해 혼잡의 특성을 나타내고 설명하는데 좋은 도구가 될 수 있다고 하였으며, 가중치의 경우 혼잡의 지속시간을 나타내는 척도로 사용할 수 있다는 의견을 제시하였다.

Jun(2010)에서는 통행자들이 혼잡에 대해서 유동적으로 반응할 수 있는 휴일의 혼잡에 대해서 분석하고자 하였다. 휴일의 여행일정의 경우 혼잡한 경우 일정을 변경할 수 있기 때문에 휴일에 집중되는 교통량에 의해 발생하는 속도 패턴과 혼잡 특성의 다양성에 관해서 연구하고자 하였다. 연구는 2006년 추수감사절 연휴 기간 동안을 대상으로 분석하였으며 가우시안 혼합 모형과 K-Means를 통하여 교통 혼잡 패턴을 분석하였다. 데이터의 경우 15분 단위 평균 통행속도 자료를 활용하였다. 혼잡인 경우와 원활한 경우 2가지의 속도 분포가 혼합되어 있다고 가정하였으며, 더 나은 클러스터링을 위해 두 집단간의 평균 속도 차이가 15m/h 이상인 경우로 클러스터링하도록 하였다. 혼잡이 발생하고 있는 것으로 나타나는 교통류의 경우 제한속도보다 10m/h 낮은 속도를 보이는 것으로 나타났다. 가우시안 혼합 모형과 K-Means 두 가지 군집 분석 수행 결과 가우시안 혼합 모형의 경우 각 집단별 확률(가중치)의 계산이 가능하여 더 우수한 것으로 나타났다.

Kocatepe, Ozguven, Vanli & Moses(2017)에서는 속도의 변화가 교통사고 발생의 주요한 원인임을 지적하고 미국 플로리다주 남동부에 위치한 고속도로를 대상으로 다양한 클러스터링 접근 방법을 활용하여 분석하였다. 교통사고 발생에 영향을 미치는 속도가 느리거나 다른 분포를 보이는 집단의 비율이 대상지 별로 어떻게 분포하고 있는지 파악해보고자 하였다. 분석에는 K-Means, X-Means, 가우시안 혼합 모형을 활용하였다. 분석기간은 2012년과 2013년의 추수감사절 기간으로 혼잡이 심한 기간을 분석대상 기간으로 설정하였다. 분석에 이용한 데이터는 15분 단위

통행속도 자료를 활용하였다.

가우시안 혼합 모형, K-Means와 같은 클러스터링 기법 이외에 통행속도 분포를 혼잡과 원활로 구분할 수 있는 방법에 관련된 연구로 장현호, 이송봉, 한동희 & 이영인(2017)에서는 대표그룹 탐색법을 활용하여 고속도로 구간통행시간을 추정하고자 하였다. 고속도로의 경우 버스전용차로, 휴게소, 졸음쉼터 등이 존재하는 구간의 경우 다양한 통행시간을 보이게 되어 여러 개의 그룹이 존재할 수 있다. 이러한 경우 모든 그룹을 포함하는 통행속도는 구간을 대표하는 통행속도라고 할 수 없기 때문에 이상치를 제거하여 구간 통행속도를 추정하였다. 대표그룹 탐색법은 반복적으로 시행되는데 통행속도의 중위값을 이용하여 양방향에 분포하고 있는 데이터의 밀도를 측정한다. 이후 밀도가 낮은 구간을 황금비를 활용하여 제거하며 이를 반복하여 대표그룹을 도출한다. 해당 연구에서는 대표그룹 탐색법을 1번 활용하여 대표그룹을 도출하는 데 활용하였지만, 본 연구에서는 대표그룹 탐색법을 1번 활용한 뒤 대표그룹을 도출하고 자료에서 대표그룹을 제거하여 다시 2번째로 대표그룹 탐색법을 활용하게 된다면 두 가지 그룹을 도출할 수 있어 검토하였다.

Azimi & Zhang(2010)에서는 K-Means, C-Means, CLALA 3가지 클러스터링 기법을 활용해 교통상황을 분류하였다. HCM과 비교하기 위하여 A부터 F까지 6개 집단으로 나누었다. 데이터는 2004년 11개월 동안의 15분 단위 교통량, 시간, 점유율, 속도, 트럭의 수가 포함된 데이터를 활용하였다. 대상지는 미국 텍사스주 오스틴의 US-290 동쪽 방향 도로로 설정하였다. 밀도-빈도, 교통량-속도, 교통량-밀도에 대한 2차원에 흩어져 있는 데이터에 대해서 6개 집단으로 클러스터링하였으며 HCM과 비교한 결과 K-Means 방법이 HCM에서 정의하고 있는 LOS와 더 일관성 있게 나타났다. 추후 과포화된 교통류에 관한 연구와 교통사고와 같은 돌발상황에 대한 처리, 중차량에 관한 연구를 향후 과제로 남겼다.

<표 1> 클러스터링을 활용한 혼잡판단

구분		내용
Ko & Guensler (2005)	문헌명	Characterization of Congestion Based on Speed Distribution: A Statistical Approach Using Gaussian Mixture Model
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦평일 15분 단위 평균 통행속도 자료를 활용 ◦가우시안 혼합 모형을 활용하여 혼잡과 원활 구분
Jun (2010)	문헌명	Understanding the Variability of Speed Distributions under Mixed Traffic Conditions Caused by Holiday Traffic
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦K-Means와 가우시안 혼합 모형 사용하여 교통 혼잡 패턴 분석 ◦두 집단 평균 속도 차가 15m/h인 경우에만 클러스터링
Kocatepe, et al. (2017)	문헌명	Analysis of Speed Patterns on Inter-urban Parallel Highways: A Case Study in the Southeast Florida
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦추수감사절 기간 15분 단위 평균 통행속도 자료 활용 ◦K-means, X-means, 가우시안 혼합 모형 활용하여 통행속도 분포가 다른 집단을 클러스터링
장현호 외 3명 (2017)	문헌명	밀도기반 비집계 접근법을 이용한 구간통행시간 추정 방법론
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦대표그룹 탐색법을 활용하여 고속도로 구간통행시간을 추정 ◦중위값을 이용해 좌우측 밀도를 계산하여 밀도가 낮은 쪽의 데이터를 제거해 구간통행시간 대표그룹을 도출
Azimi & Zhang (2010)	문헌명	Categorizing Freeway Flow Conditions by Using Clustering Methods
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦K-Means, C-Means, CLALA를 활용하여 6가지 집단으로 분류 ◦HCM의 LOS와 비교한 결과 K-Means가 가장 정확도가 높은 것으로 나타남

2) 혼잡 지표를 활용한 혼잡판단

이진수(2018)에서는 기존 연구의 지점기반 수집데이터가 아닌 구간 기반 수집데이터인 DSRC 데이터를 활용하였다. 혼잡판단에는 개별 차량 속도 감소율 지표(VSRI)로 설정하여 활용하였다. VSRI는 차량별 실제 주행속도와 희망 주행속도를 산출하여 계산한다. 0에서 1사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 속도 감소율의 평균치가 증가하여 혼잡하다는 것을 의미한다. 0에서 1사이의 값 중에서 혼잡을 경계할 수 있는 값은 도로용량편람에서 고속도로 기본구간의 서비스수준에 해당되는 교통량 값을 사용하였으며 혼잡관리 목표수준으로 제시하고 있는 서비스수준 C에 해당되는 값을 활용하였다.

김진태 & 조용빈(2018)에서는 비효율적인 신호 운영을 줄이기 위하여 교통신호 운영상황 갱신 전과 후의 상황을 혼잡강도 지표를 통하여 비교하여 개선효과를 파악하고자 하였다. 데이터는 서울특별시 TOPIS에서 관내 영업용 차량에 부착된 Digital Tacho Graph 장치로 수집된 원시자료를 5분 단위로 가공한 자료를 활용하였다. 분석기간은 2016년 1년간 데이터에 대해서 분석하였으며 분석 대상지는 서울특별시에 위치하고 있는 간선도로, 보조간선도로, 기타도로로 설정하였다. 혼잡강도의 임계값을 도출하기 위해서 Duncan's Test를 시행하였다.

정희진, 윤진수 & 배상훈(2017)에서는 순환인공신경망을 활용하여 서울특별시 주요 간선도로를 대상으로 교통혼잡을 예측하고자 하였다. 데이터는 2013년 4월 1일부터 2013년 9월 30일까지 수집된 프로브 차량의 GPS데이터를 활용하였다. 연구에서 활용하는 예측 모형의 범위는 연구에서 대상으로 하고 있는 도심부 도로망에서 수집된 실시간 교통자료를 활용하여 다음 1시간 동안의 소통상황을 15분 단위로 예측하고자 하였는데 소통상황을 평가하는 것은 Traffic Performance Index (TPI)를 이용하였다. TPI는 일반적으로 제한속도의 1.2배를 기준으로 계산되는 자유속도에 대해서 현재 평균 통행속도와의 차의 오차비율을 계산하여 지체도를 계산하는 지표이다. 연속류의 경우 0.4 이하의 경우 원활, 0.7 이상의 경

우 지체로 분류할 수 있으며 단속류의 경우 신호와 같은 기타 다른 요인으로 인하여 사용이 제한적일 수 있고 하였다.

김동현, 황기연 & 윤영(2019)에서는 심층인공신경망을 활용하여 폭우 폭설 등의 다양한 기상조건과 교통사고, 돌발 상황, 인구 등 다양한 상황을 기반으로 서울특별시의 도로 링크별 교통 혼잡도를 예측하고자 하였다. 데이터는 TOPIS에서 5분 단위로 수집되는 링크 통행속도 데이터를 1시간 단위로 가공한 통행속도 데이터와 기상데이터, 지하철 승하차 인원, 집계구 생활인구 등의 데이터를 활용하였다. 연구에서 혼잡은 Heavy, Medium, Light 3단계로 나뉘어진다. 평균 통행속도를 이용하여 나뉘어지며, Heavy의 경우 고속도로는 30km/h이하, 도심내 도로의 경우 15km/h이하이며 Medium의 경우 고속도로는 30~50km/h, 도심내 도로의 경우 15~25km/h이며 Light의 경우 고속도로는 50km/h이상, 도심내 도로의 경우 25km/h 이상으로 단순히 평균 통행속도를 각 기준들과 비교하여 혼잡을 판단하였다.

북기찬, 이승준, 최윤혁, 강정규 & 이승환(2009)에서는 원활과 혼잡을 구분할 수 있는 종합소통지수, TCI(Traffic Condition Index)를 개발하였다. TCI는 고속도로의 차량 소통상태를 계량화해 혼잡관리목표와 비교하여 객관적인 지수로 정의한다. 종합소통지수에는 설계속도, 설계밀도, 통행속도, 통행밀도 자료가 이용된다. 혼잡관리목표에는 서비스수준 D를 기준으로 하여 설계밀도로 적용하였다. 서비스수준을 고려하여 소통상태가 구분되며 TCI값 0~50은 혼잡한 상황, 50~70은 소통이 양호한 상황, 70~100은 소통이 원활한 상황으로 구분된다.

이상건 & 박진호(1997)에서는 통행밀도와 km내에 수용할 수 있는 최대 차량수인 포화통행밀도 개념을 활용하는 OCI(Occupancy Congestion Index) 지표를 개발하였다. 이 혼잡지표를 활용한다면 혼잡크기를 시간적, 공간적 범위에 대해서 표현할 수 있으며 지표값 크기에 의한 혼잡강도 또한 표현이 가능하다. 혼잡판단 기준은 교통시설 서비스 제공목표에 따라 달라질 수 있다고 하였다.

<표 2> 혼잡 지표를 활용한 혼잡판단

구분		내용
이진수 (2018)	문헌명	실시간 고속도로 혼잡판단 지표 및 알고리즘 구축
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦실제 주행 속도와 희망 주행 속도를 산출하여 개별 차량 속도 감소율 지표를 계산 ◦지표값 0.35를 혼잡관리 목표로 설정하여 혼잡을 판단
김진태 & 조용빈 (2018)	문헌명	교통소통 정보기반 신호교차로 운영평가를 위한 혼잡강도 지표 임계값 연구
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦서울시 TOPIS DTG자료를 5분 단위로 가공한 자료를 활용 ◦Duncan's test를 시행하여 링크별로 혼잡강도 임계값을 도출
정희진 외 2명 (2017)	문헌명	순환인공신경망(RNN)을 이용한 대도시 도심부 교통 혼잡 예측
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦프로브 차량의 GPS데이터를 활용하여 교통 혼잡 분석 ◦TPI값 0.4이하의 경우 원활, 0.7이상의 경우 혼잡으로 판단
김동현 외 2명 (2019)	문헌명	심층인공신경망(DNN)과 다각도 상황 정보 기반의 서울시 도로 링크별 교통 혼잡도 예측
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦TOPIS 1시간 단위 평균 통행속도 데이터 활용하여 혼잡분석 ◦30km/h, 30~50km/h, 50km/h로 구간을 나누어 혼잡을 판단
복기찬 외 4명 (2009)	문헌명	고속도로 소통상태지수 개발에 관한 연구
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦밀도와 속도를 활용한 TCI 지표를 개발 ◦서비스수준을 이용하여 혼잡판단기준 제시
이상건 & 박진호 (1997)	문헌명	도로교통혼잡지표 개발에 관한 연구
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦통행밀도와 포화통행밀도를 활용한 OCI 지표를 개발 ◦교통시설 서비스 제공목표에 따라 혼잡판단 기준 적용

2. 혼잡전이 및 원인 분석

김상구 & 김영춘(2006)에서는 고속도로 합류부를 대상으로 전이교통류 특성을 분석하였다. 데이터 수집의 경우 실제 항공사진을 Matlab 프로그램을 이용하여 차로별로 50ft 간격으로 분할하여 개별 교통량, 속도, 밀도, 데이터를 생성하였다. 이후 각 차로별로 시공도를 작성하여 시간적 공간적 교통류 흐름을 분석하였다.

이진수(2018)에서는 VSRI를 이용하여 혼잡을 판단하고 이후 특정 구간에 대해서 혼잡을 판단하고 예측분석을 하였다. 혼잡은 대부분 엇갈림구간에서 발생하여 상류부로 전이되는 행태를 보였다. 따라서 예측분석을 위하여 엇갈림구간의 혼잡 검지시각과 전이된 상류부 기본구간의 혼잡 검지시각을 이용하여 혼잡전이 속도를 도출하였으며, 엇갈림 구간에서 혼잡 발생시 상류부 기본구간의 혼잡이 발생하는 시각을 예측하는데 이용하였다.

Saeedmanesh & Gerolimimis(2017)에서는 유사한 교통상황을 가지는 링크들을 클러스터링하였다. 기존의 연구에서는 시계열적 분석이 부족하여 혼잡이 어떻게 전파되어 가는지 분석이 부족하였다면 이 연구에서는 시계열적으로 분석하여 거시적인 관점에서 혼잡의 전파를 관찰하였다. 또한, 중요한 혼잡 상황을 파악하고자 하였는데 이는 혼잡이 시작되는 곳이라고 할 수 있다. 이 혼잡이 시작되는 곳에서 혼잡이 어떤방향으로 어떻게 전파되는지 그곳의 혼잡이 발생하게 되는 원인은 무엇인지 파악한다면 혼잡을 개선할 수 있을 것이다. 따라서 인근 링크와 노드의 제어 전략이나 설계를 개선하여 이동성을 개선방안을 제시하고자 하였다.

나소정(2000)에서는 matrix 방법을 통하여 혼잡전이 현상을 정리하였다. 기존 혼잡전이 현상을 나타내는 대표적인 모형 Cell transmission의 문제점에 대해서 실제 자료와 혼잡한 상황에서의 교통류를 고려하여 개선방안을 변형된 식의 형태로 제시하였다. 강북강변로를 대상으로 검증

하였으며 자료는 1분 단위 평균 통행시간, 교통량, 최초 존재량을 활용하였다. 검증에는 결정계수, 평균절대백분비오차를 이용하였다. 결정계수는 0.7, 평균절대백분비오차는 13으로 설득력있는 결과를 도출하였다.

<표 3> 혼잡원인 분석

구분		내용
김상구 & 김영춘 (2006)	문헌명	시공간적 관점에서 차로별 고속도로 합류구간 전이 교통류 특성 분석
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦실제 항공사진을 활용 Matlab을 활용해 교통량, 속도, 밀도 데이터 수집 ◦차로별 시공도 작성, 시간적, 공간적 교통류 흐름 분석
이진수 (2018)	문헌명	실시간 고속도로 혼잡판단 지표 및 알고리즘 구축
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦개별 차량 속도 감소율 지표를 활용하여 혼잡판단 ◦엇갈림구간에서 상류부로 혼잡이 전이되는 행태를 분석 ◦혼잡 검지시각을 활용해 혼잡전이 속도 산출
Saeedmanesh & Geroliminis (2017)	문헌명	Categorizing Freeway Flow Conditions by Using Clustering Methods
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦클러스터링 기법을 활용해 유사한 교통 상황을 가지는 링크들을 클러스터링 ◦시계열적으로 클러스터링이 변화되는 과정을 관찰 ◦혼잡전이 방향 및 원인 파악
나소정 (2000)	문헌명	교통혼잡전이 현상에 관한 연구
	시사점	<ul style="list-style-type: none"> ◦1분 단위 평균 통행시간, 교통량 등의 자료 활용 ◦기존의 혼잡전이 모형에 대한 개선 방안 제시

3. 시사점

선행연구를 고찰한 결과 다음과 같은 시사점이 남았다.

첫째로, 국내외 혼잡판단에 관련된 연구는 대부분 본선부를 중심으로 있었으며 진출입 램프에 대한 연구는 미비하였다. 이진수(2018), 김상구 & 김영준(2006) 선행연구에서 합류부를 대상으로 연구가 있었으나, 진출입 램프에 대한 분석은 미비하였다.

둘째로, 연속류의 경우 가우시안 혼합 모형을 활용한다면 다른 모형에 비해 정확도가 높은 모형 도출이 가능하다. 진출입 램프의 경우 대부분 하이패스를 이용하여 연속류라고 할 수 있으며, 다른 방법론에 비해 가우시안 혼합 모형을 이용한다면 보다 명확한 혼잡과 원활의 구분이 가능하다고 할 수 있다. 하지만 가우시안 혼합 모형의 경우 연구자가 혼합 모형의 수 K 개를 정해야 하기 때문에 교통류별 상황에 맞게 분류하는 것이 어렵다는 모형의 한계점을 제시하였다.

셋째로, 도시부 도로나 고속도로 엇갈림구간에 관한 혼잡전이 연구는 있었으나 고속도로 진출입 램프를 대상으로 분석하는 혼잡전이 및 원인 분석에 관한 연구는 미비하였다.

국토교통부(2017)에 의하면 진출입 램프의 경우 상충지점이 많아 급격한 통행속도 변화가 나타나며, 설계 시 최소기준을 적용하여 혼잡, 지체가 발생할 확률이 높다고 하고 있다. 그럼에도 과거의 연구가 본선부에 집중되었던 이유는 고속도로와 국도의 도로관리 기관이 이원화 되어있어, 책임을 전가하는 경향이 있으며, 협조체계가 미약하다. 또한, 혼잡관리를 위한 최신 ICT 기술의 활용이 미흡하여 소통상황에 대한 정보가 부족하여 연구가 미비한 상황이다.

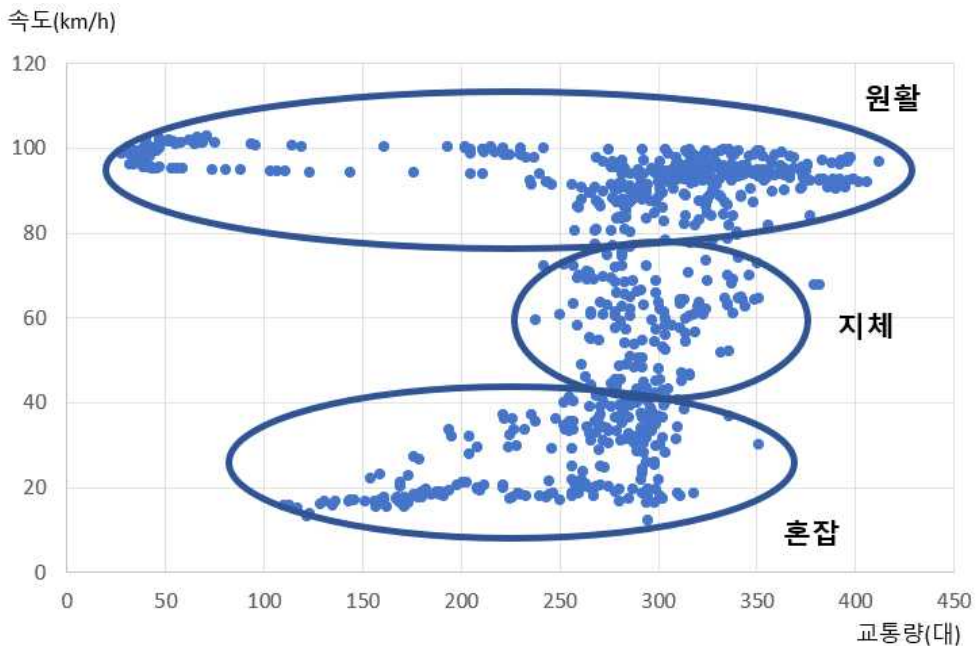
따라서 본 연구에서는 기존에 연구가 미비하였던 고속도로 진출입 램프에 대하여 기존의 한계점을 보완한 가우시안 혼합 모형을 적용하여 소통상황을 판단하는 경계속도를 도출하고, 이를 적용하여 혼잡원인 분석을 하고자 한다.

Ⅲ. 연구 방법론

1. 연구 방법론의 개요

<그림 2>는 2019년 10월 1일부터 10월 4일까지 서울외곽순환고속도로 성남IC~판교JC의 VDS 검지자료를 이용한 5분 단위 교통량과 평균 통행 속도 산포도 그래프로 표현한 그림이다. 대부분의 데이터가 그림과 같이 혼잡과 원활 상태 두 가지 소통상황으로 그룹지어 분포하고 있는 것을 볼 수 있으며 일부 지체에 포함되는 데이터도 보이고 있다. 본 연구에서는 그림과 같이 혼잡과 원활, 지체 상태를 명확하게 구분 지을 수 있는 지체·혼잡 경계 속도를 도출하고자 한다.

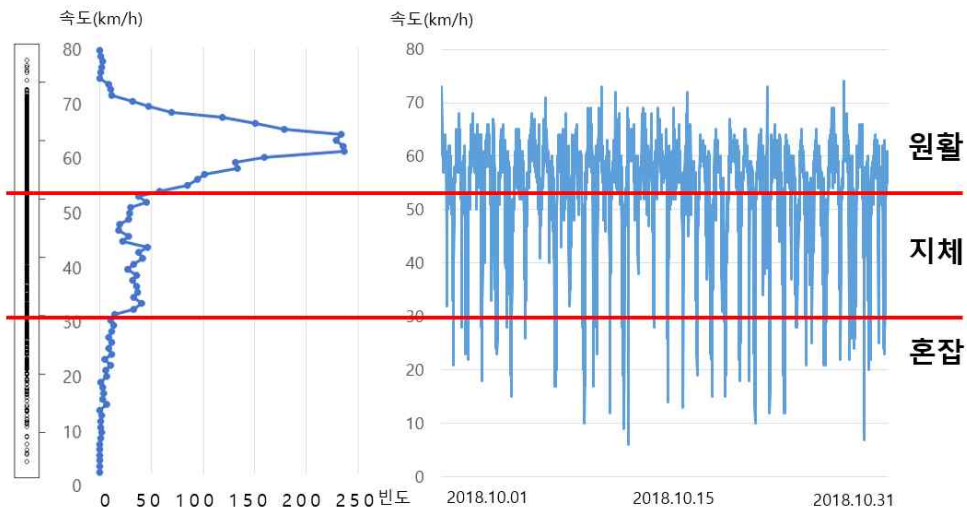
<그림 2> 통행속도 원활, 혼잡의 군집 현상



본 연구에서는 고속도로의 진출입 램프를 구성하는 경로 단위의 지체·혼잡 경계 속도를 도출하고자 한다. 고속도로 진출입 램프라는 분석 대상 구간의 특성상 본선부에 비해 기하구조나 제한속도 등 링크의 속성 정보가 다양하다. 하나의 진출입 램프를 구성하는 링크 단위로도 접속의 형태나 통행속도의 패턴이 다양하게 나타나기 때문에 본 연구에서는 진출입 램프를 구성하는 경로 단위로 지체·혼잡 경계 속도를 도출하여 적용하였다.

<그림 3>은 현릉IC에 위치한 1210031100 링크에 대하여 10월 한달간 15분 단위 통행속도 데이터를 활용하여 혼잡판단 방법의 예시를 설명한 그림이다. 그림의 왼쪽 부분과 같이 1차원 형태의 속도 그래프를 확률밀도함수 형태로 변환한 뒤 가우시안 혼합 모형을 활용하여 지체·혼잡 경계 속도를 도출한다. 이후 도출된 지체·혼잡 경계 속도를 그림의 오른쪽 부분과 같이 해당 링크에 적용하여 혼잡과 원활을 구분할 수 있다.

<그림 3> 소통상황 판단 방법



2. 가우시안 혼합 모형

본 연구에서는 지체·혼잡 경계 속도 도출을 위해 가우시안 혼합 모형을 활용하고자 한다. 가우시안 혼합 모형은 데이터들이 주어져 있을 때 데이터의 값들이 서로 다른 가우시안 분포로부터 나온 데이터라고 할 때 그 데이터 중 어떤 데이터가 어떠한 가우시안 분포에 속할 것이며 그 가우시안 분포가 가지는 평균과 분산의 값은 어떠한지 알고자 할 때 사용할 수 있는 모형이다. 모형을 추정하기 위해서 EM(기대값-최적화, Expectation-Maximization) 알고리즘이 주로 사용된다. 다음 식(1)은 K개의 가우시안 분포의 중첩에 관한 식이다.

$$p(x) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(x|\mu_k, \sigma_k^2) \text{-----}(1)$$

각각의 가우시안 밀도 $N(x|\mu_k, \sigma_k^2)$ 은 혼합의 집단이며 각각 기댓값(μ_k)과 분산(σ_k^2)을 가진다. 여기서 매개변수 π_k 는 혼합계수이다. 각각의 혼합계수의 합은 1이 된다. 혼합계수는 0에서 1사이 값을 가진다.

복수의 K개의 가우시안 분포에 대하여 데이터를 분석하고자 하는 이용자가 K의 값을 설정해야 한다. 본 연구에서는 가장 최적의 집단 수로 나누기 위하여 BIC(Bayesian Information Criteria)를 이용하여, BIC값이 최대가 되는 최적 군집수를 가진 모형을 선택하여 도출하였다. BIC는 식(2)를 이용하여 구할 수 있다.(Fraley & Raftery, 1998)

$$BIC = 2\log \text{likelihood} - p \log(n) \text{-----}(2)$$

K값이 다른 각각의 가우시안 혼합 모형 중에서 최적 모형을 도출하기 위해 사용하는 BIC는 대부분의 경우에서 BIC를 산출하기 위해 사용하는 식과 부호를 반대로 사용하고 있어, BIC가 최대가 될 때 최적의 모형으로 도출한다.

각 집단 K는 EM 알고리즘을 통해 평균속도(μ_k), 분산(σ_k^2), 혼합계수(π_k)를 도출할 수 있으며, 그 도출과정은 다음과 같다.

EM 알고리즘은 기댓값 단계(E-Step), 최대화 단계(M-Step)로 구성된다. EM 알고리즘의 목표는 각 매개변수 (μ_k, σ_k^2, π_k)에 대해서 로그 가능도 함수를 최대화하는 것이다.

첫 번째로 각 매개변수를 초기화하고 로그 가능도 함수의 초깃값을 구한다. 두 번째는 기댓값 단계(E-Step)로 현재의 매개변수 값들을 바탕으로 책임 값들을 구한다.

$$p(z = k) = \pi_k \text{-----} (3)$$

$$p(x|z = k) = N(x|\mu_k, \sigma_k^2) \text{-----} (4)$$

먼저 식(1)을 통해 설명한 내용을 바탕으로 식(3)과 (4)를 도출할 수 있으며 두 가지 식과 베이지 정리를 이용하면 n번째 데이터가 그룹 k에 속할 확률($\gamma(znk)$)을 즉 책임 값을 다음 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$\gamma(znk) = \frac{\pi_k N(x_n|\mu_k, \sigma_k^2)}{\sum_{j=1}^K \pi_j N(x_n|\mu_j, \sigma_j^2)} \text{-----} (5)$$

세 번째는 최대화 단계(M-Step)로 현재 $\gamma(znk)$ 값들을 바탕으로 매개변수를 재추정한다. 각 매개변수 재추정하는 방법은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_k &= \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^N \gamma(znk) x_n \text{-----} (6) \\ \sigma_k^2 &= \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^N \gamma(znk) (x_n - \mu_k)(x_n - \mu_k)^T \\ \pi_k &= \frac{N_k}{N} \end{aligned}$$

네 번째는 로그 가능도를 구하는 단계이며 다음 식(7)과 같은 방법으로 도출한다.

$$\ln p(X|\mu, \sigma^2, \pi) = \sum_{n=1}^N \ln \sum_{k=1}^K \pi_k N(x_n | \mu_k, \sigma_k^2) \text{-----} (7)$$

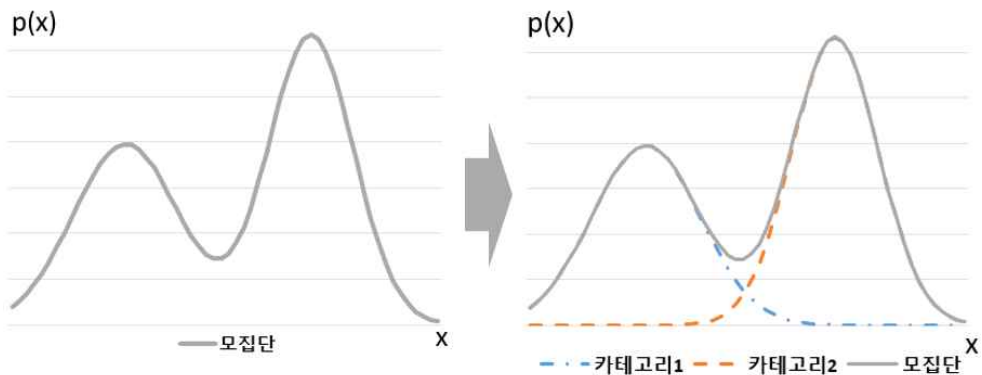
위의 과정들은 로그 가능도를 증가시키며 로그 가능도의 수렴 여부를 확인하여 수렴 기준에 만족하지 못한다면 두 번째 단계로 돌아가 반복하게 된다.

로그 가능도가 특정 값으로 수렴한다면, 각 집단 k는 위의 과정을 통해 도출된 평균속도(μ_k), 분산(σ_k^2), 혼합계수(π_k)를 가지게 된다. 각 매개변수를 활용해 각 집단 k는 다음 식(8)과 같은 분포를 가진다.

$$\pi_k \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}\right) \text{-----} (8)$$

기존의 모집단 데이터를 이용하여 가우시안 혼합 모델을 적용하여 K 집단별로 도출된 평균속도(μ_k), 분산(σ_k^2), 혼합계수(π_k)와 식 (8)을 이용하여 그래프를 그리면 <그림 4>와 같은 모양의 그래프를 얻을 수 있다.

<그림 4> 가우시안 혼합 모형



3. 지체·혼잡 경계 속도 도출

지체·혼잡 경계 속도를 도출하기 위해서 먼저 가우시안 혼합 모형을 활용하여 여러 군집으로 속도자료를 분류해야 한다. 이때 분류하는 최대 군집의 수는 연구자가 정해야 한다.

Fraley & Raftery(1998)에서는 가능한 K값의 범위를 작게 설정하는 것이 좋다고 설명하고 있다. 지나치게 K의 범위를 넓게 설정할 경우 정확한 모형을 추출할 수 없으며, 연산속도가 떨어진다. 또한, 제한속도가 30km/h인 경로의 경우 30개의 집단으로 나누는 것은 어떠한 의미도 가질 수 없다. 따라서 본 연구에서는 가우시안 혼합 모형을 적용하기에 앞서 최대 군집수 K를 설정하기 위해 각 경로에 대하여 최적 군집수를 찾도록 하였다. 군집수는 최대 15개까지 설정하여 분석한 결과는 <표 4>와 같다.

<표 4> 최대 군집수 예비분석

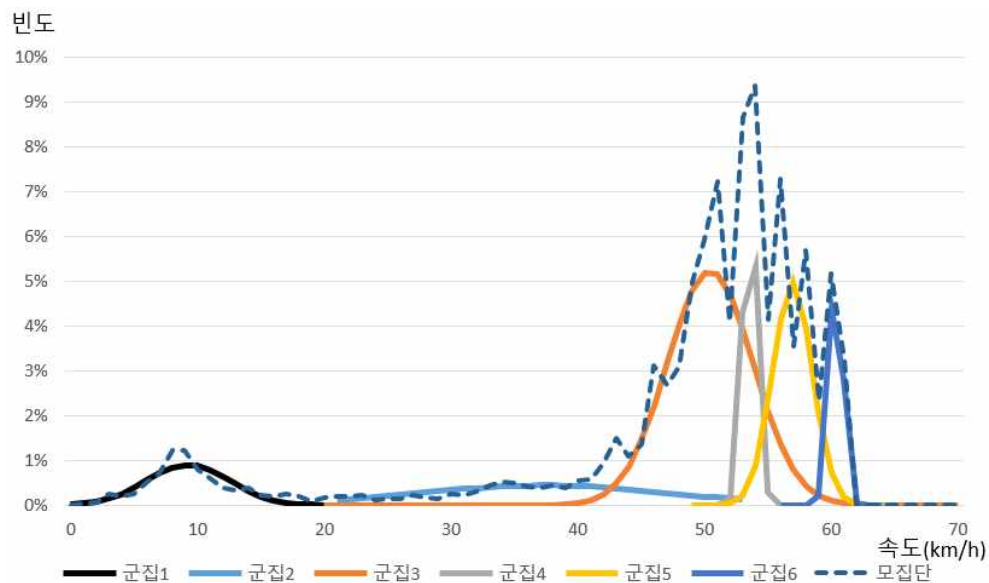
평일					주말				
최적 군집수	경로	누적	누적(%)	누적 증가율(%)	최적 군집수	경로	누적	누적(%)	누적 증가율(%)
0	70	70	4.21	0	0	82	82	4.93	0
1	8	78	4.69	11.43	1	9	91	5.48	10.98
2	318	396	23.83	407.69	2	84	175	10.53	92.31
3	117	513	30.87	29.55	3	256	431	25.93	146.29
4	189	702	42.24	36.84	4	361	792	47.65	83.76
5	239	941	56.62	34.05	5	269	1061	63.84	33.96
6	194	1135	68.29	20.62	6	209	1270	76.41	19.70
7	117	1252	75.33	10.31	7	107	1377	82.85	8.43
8	106	1358	81.71	8.47	8	61	1438	86.52	4.43
9	77	1435	86.34	5.67	9	34	1472	88.57	2.36
10	55	1490	89.65	3.83	10	25	1497	90.07	1.70
11	28	1518	91.34	1.88	11	27	1524	91.70	1.80
12	28	1546	93.02	1.84	12	20	1544	92.90	1.31
13	31	1577	94.89	2.01	13	41	1585	95.37	2.66
14	35	1612	96.99	2.22	14	27	1612	96.99	1.70
15	50	1662	100	3.10	15	50	1662	100.00	3.10

군집수의 범위는 작게 설정하는 것이 좋다는 Fraley & Raftery(1998)의 선행연구의 결과와 최대한 많은 경로에 대한 최적 군집수를 적용하기 위해 결과를 종합적으로 고려하였다.

평일의 경우 최대 군집수를 7개로 설정할 경우 전체 경로의 75.33%에 해당되는 경로가 최적의 경로 선택이 가능하다. 또한, 증가율을 고려할 때 7개에서 8개로 증가하는 증가율은 8.47%로 10%보다 작아지는 구간이다. 주말의 경우 최대 군집수를 6개로 설정할 경우 전체 경로의 76.41%에 해당되는 경로가 최적의 경로 선택이 가능하다. 또한, 증가율을 고려할 때 6개에서 7개로 증가하는 증가율은 8.43%로 10%보다 작아지는 구간이다. 위의 분석 결과에 따라 최대 군집수는 평일은 7개, 주말은 6개로 설정하여 분석하였다.

<그림 5>는 가우시안 혼합 모형을 활용하여 서해안선 발안 IC 상행 진입 경로의 2018년 10월 속도자료를 가우시안 혼합 모형으로 분류한 그림이다. 모집단과 거의 유사하도록 분류된 것을 직관적으로 확인할 수 있다.

<그림 5> 가우시안 혼합 모형 군집 분류 - 발안 IC 상행 진입



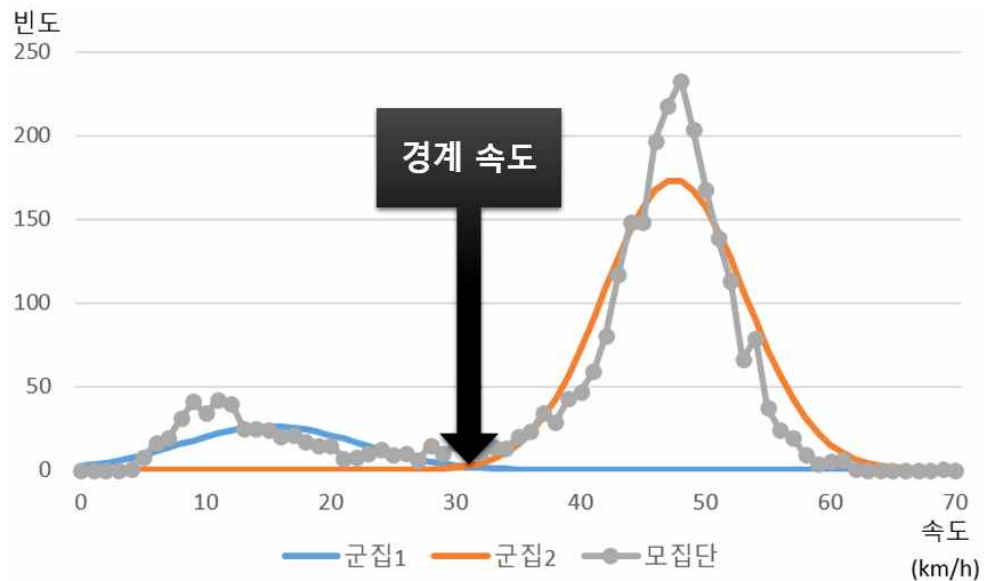
경계 속도는 각각 다른 군집으로 분류된 두 군집의 교차점으로 다음과 같은 식(9)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\pi_1 \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) = \pi_2 \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \text{-----}(9)$$

식(9)과 같이 x 에 대한 2차 방정식으로 정리할 수 있으며, 여기서 x 는 2개의 해를 가질 수 있지만, x 는 두 군집의 교차점이므로 x 의 범위는 두 군집의 평균값 사이로 설정하여 도출한다. <그림 6>은 경계 속도를 도출하는 내용에 대하여 그림으로 표현한 자료이다.

위와 같이 정의된 경계 속도를 추정하는 데 있어서 다음과 같은 두 가지 문제가 발생한다. 첫 번째로 여러 개로 분류된 군집이 각각 어떠한 소통상황을 보이고 있는가? 두 번째로 여러 개의 군집으로 인해 발생하는 여러 개의 교차점 중 어떠한 교차점을 지체·혼잡 경계 속도로 정의할 것인가?

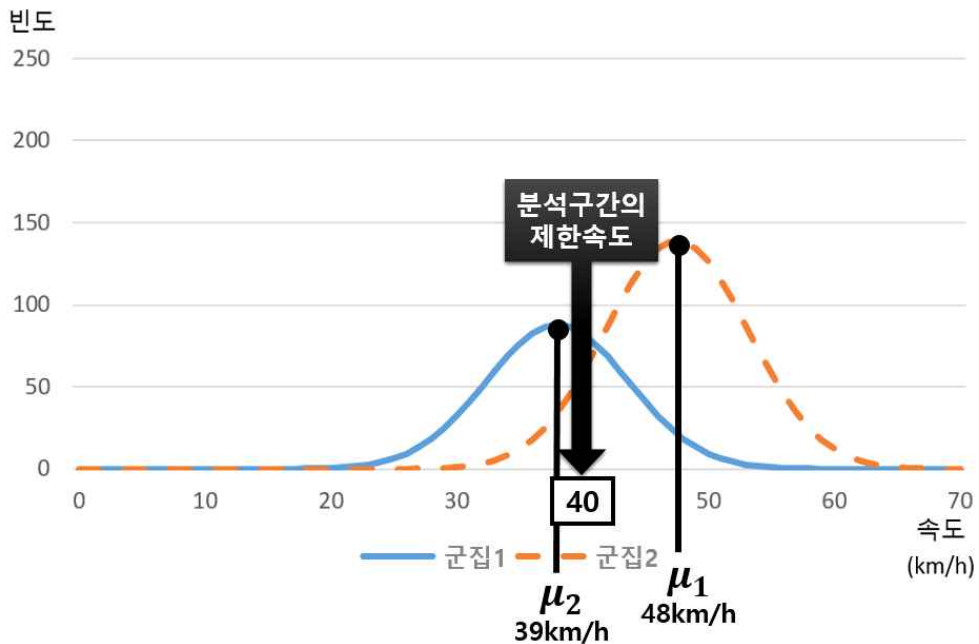
<그림 6> 경계 속도 도출



1) 군집별 소통상황 분류

<그림 7>은 첫 번째로 제시한 소통상황 구분 문제점에 관한 내용으로, 속도 데이터가 두 개의 군집으로 나누어진 그림이다. 두 군집 모두 제한 속도인 40km/h에 가까운 분포를 보이고 있어 소통상황이 원활한 군집으로 보인다. 따라서 <그림 7>과 같은 경우에는 두 군집이 같은 소통상황이므로 여기서 교차점은 두 군집을 구분하는 경계 속도라고 할 수 없다.

<그림 7> 원활한 두 군집 분류



위와 같은 문제를 해결하기 위하여 교통 소통상황을 나타내는 지표를 활용하였다. 선행연구에서 검토하였던 다양한 지표 중 통행속도를 활용한 지표를 검토하였고, 정희진 외 2명(2017)에서 소통상황 판단에 활용한 지표인 TPI(Traffic Performance Index)를 활용하였다. TPI를 산출하는 방법은 식(10)과 같다.

$$TPI = \frac{V_f - V_i}{V_f} \text{-----}(10)$$

여기서 V_f 는 자유속도를 의미하며 일반적으로 제한속도의 1.2배로 계산할 수 있다. V_i 는 현재의 평균 통행속도를 의미한다. TPI는 자유속도 대비 현재의 평균 통행속도가 얼마만큼 감소하였는지에 관한 지표로 0에서 1사이의 값을 가진다. 정희진 외 2명(2017)에서는 0.4보다 작은 경우 원활, 0.7보다 클 경우 혼잡으로 분류하였다.

정희진 외 2명(2017) 연구는 도시부에 관한 연구로 여기서 쓰인 0.4와 0.7이라는 값이 연속류에 가까운 진출입 램프에도 적용이 가능한지 파악하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 연속류에 대하여 속도를 활용해 혼잡, 지체, 원활을 구분하는 선행연구를 <표 5>와 같이 검토하였다.

정희진 외 2명(2017)에서 사용한 혼잡과 지체의 경계속도는 제한속도 100km/h 기준 원활 72km/h 이상, 혼잡 36km/h 이하이다. 이러한 기준은 한국도로공사(2008)의 판단기준 80km/h, 40km/h와 유사하다. 또한, 현재 많은 이용자를 보유하고 있는 카카오맵과 네이버 지도의 기준 또한 이와 유사하다. 국외사례를 검토한 결과 원활이 아님을 판단하는 기준은 약 70km/h 수준으로 나타났다. 국내외 사례를 검토한 결과 원활이 아닌 교통류를 판단하는 기준은 70 ~ 80km/h 수준이며, 혼잡의 경우 30 ~ 40km/h 수준으로 나타났다. 정희진 외 2명(2017)에서는 지체에 관한 내용은 제시되어 있지 않다.

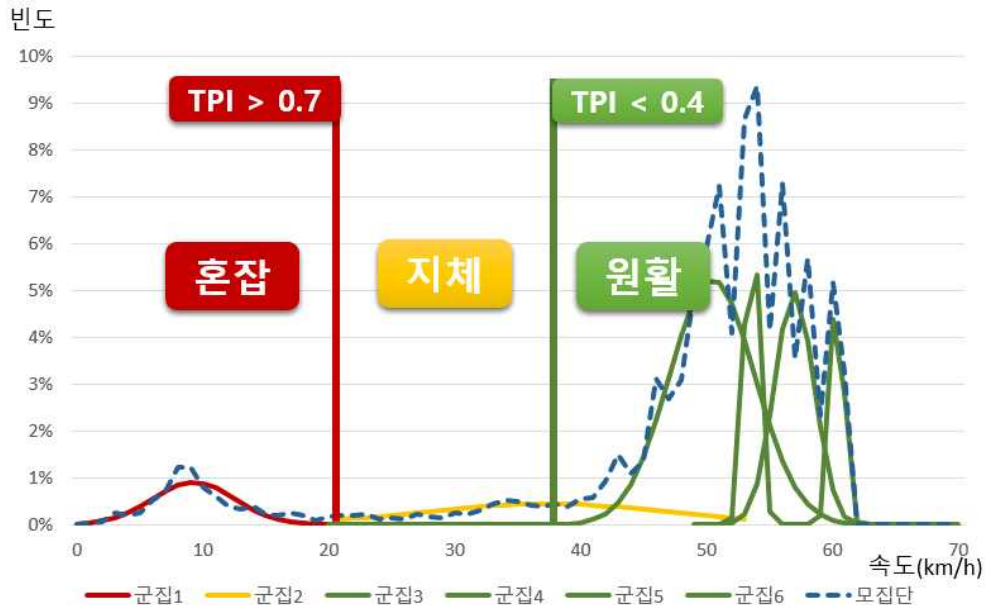
김상구 & 김근덕(2011)에서는 원활과 혼잡한 교통류 사이에 존재하는 또 다른 교통류가 존재하는 것으로 2000년대 이후 연구 결과가 도출되었다고 한다. 본 연구에서는 더 현실적인 소통상황 판단을 위하여 용량을 초과하는 시점부터 혼잡이 발생하기까지 구간의 교통류를 지체로 정의하였고, 이는 TPI 0.4 ~ 0.7 값에 해당된다.

〈표 5〉 교통 소통상황 판단기준 검토

연구 또는 기관	판단기준
한국도로공사(2008)	혼잡 : 40km/h 이하, 지체 : 40 ~ 80km/h
FHWA(2019)	혼잡 : 50mi/h (80km/h) 이하
Falcocchhio, J. C. & Levinson, H. S.(2015)	위싱턴주 : 45mi/h (72km/h) 제한속도의 75% 이하 퀘벡 : 제한속도의 60% 이하
네이버 지도	정체 : 40km/h 이하, 지체 : 40 ~ 70km/h
카카오맵	정체 : 30km/h 이하, 지체 : 30 ~ 50km/h, 서행 : 50 ~ 70km/h

따라서 본 연구에서는 혼잡, 지체, 원활을 판단하는 TPI 값의 기준을 0.4 이하는 원활, 0.4 ~ 0.7은 지체, 0.7 이상은 혼잡으로 설정하여 분석하였다. 〈그림 8〉은 TPI를 활용해 소통상황에 따라 군집을 분류한 그림이다.

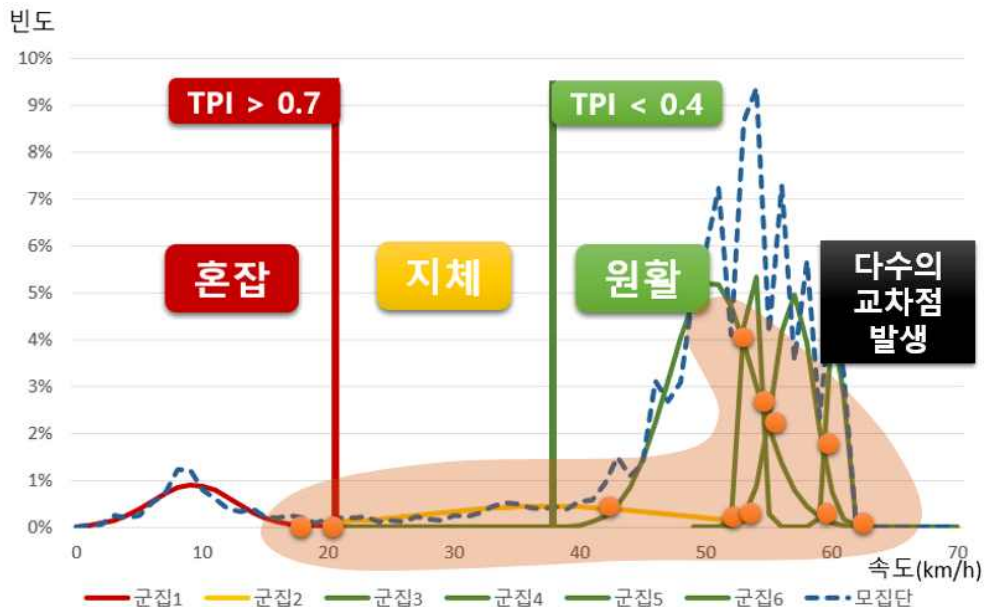
〈그림 8〉 군집별 소통상황 분류 - 발안 IC 상행 진입



2) 소통상황별 군집화

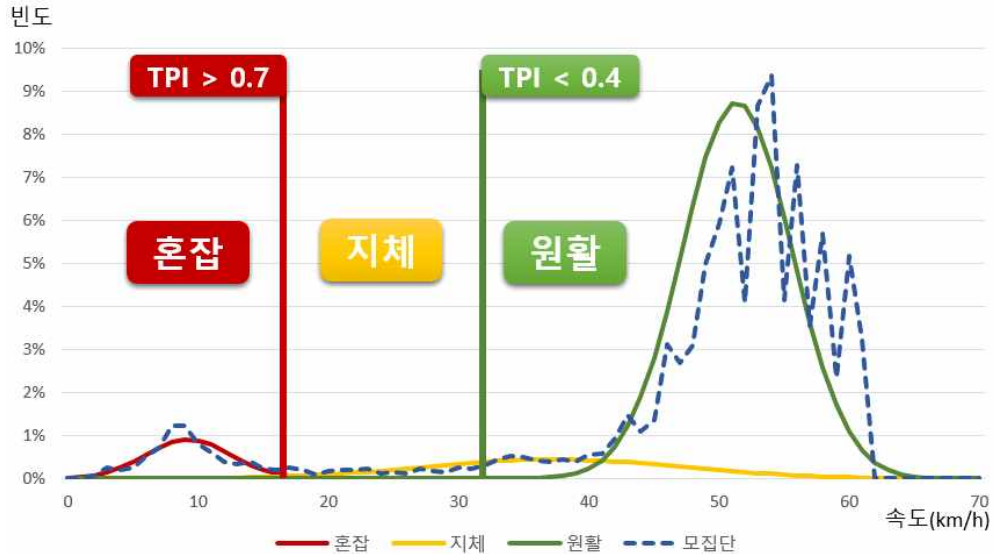
가우시안 혼합 모형을 활용하여 분류한 1 ~ 6개의 군집 중에서 각 군집이 혼잡 또는 지체, 원활 3가지의 소통상황 중에서 어떠한 상황에 속하는지 판단했다면, 다음으로 어떠한 교차점을 경계 속도로 합리적으로 선정할 것인가에 대한 문제가 남는다. <그림 9>는 가우시안 혼합 모형으로 분류된 6개의 군집간의 다양한 교차점이 발생하게 된다는 내용을 설명하는 그림이다. 혼잡과 지체에 해당되는 군집은 각각 1개로 혼잡과 지체의 소통상황을 대표하는 군집이라고 할 수 있지만 원활에는 군집 3, 4, 5, 6의 4개의 군집이 있어 어떠한 군집을 소통상황을 대표하는 군집이라고 합리적으로 선정하기 어렵다. 또한, 이들 군집 중 가장 큰 군집 하나만을 선택하여 교차점을 찾는다고 해도 이는 나머지 군집에 포함된 데이터는 제외하고 분석하는 것이 되기 때문에 합리적이지 못하다.

<그림 9> 군집 간의 교차점 - 발안 IC 상행 진입



따라서 본 연구에서는 소통상황별로 군집이 여러 개 나타나는 경우 혼합계수(π_k)를 활용, 평균속도(μ_k), 분산(σ_k^2)을 가중평균하여 하나의 군집으로 통합하였으며 <그림 10>과 같다.

<그림 10> 소통상황별 군집화 - 발안 IC 상행 진입

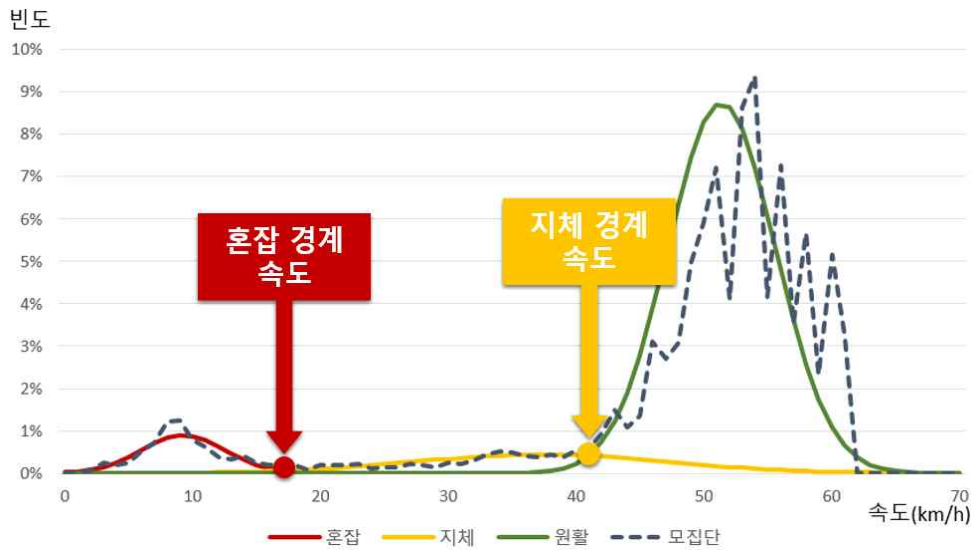


본 연구에서는 혼잡과 지체, 원활 3가지로 군집을 분류하기 때문에 두 집단의 평균사이의 교차점을 찾더라도 혼잡과 지체, 지체와 원활, 혼잡과 원활 3가지 교차점이 발생하게 된다.

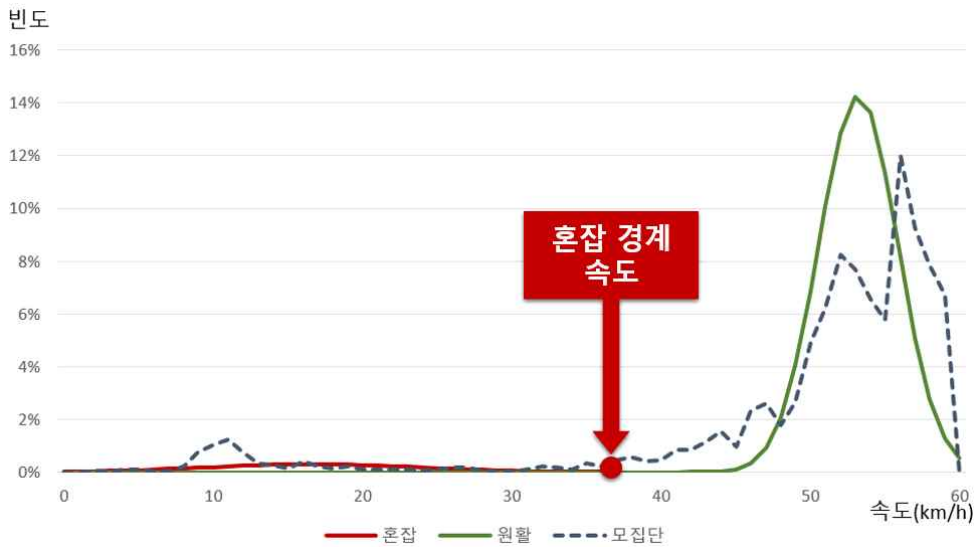
먼저 지체와 원활 군집의 교차점은 지체 경계 속도로 정의하며, 혼잡과 지체 군집의 교차점은 혼잡 경계 속도로 정의하며, <그림 11>과 같이 도출할 수 있다.

추가로 지체 군집이 존재하지 않아 혼잡과 원활 두 개 집단의 교차점만 존재하는 목천 IC 상행 진출과 같은 경로도 존재한다. 이러한 경우에는 혼잡 경계 속도로 정의하며, <그림 12>와 같이 도출할 수 있다.

<그림 11> 지체·혼잡 경계 속도 도출 - 발안 IC 상행 진입



<그림 12> 혼잡 경계 속도 도출 - 목천 IC 상행 진출



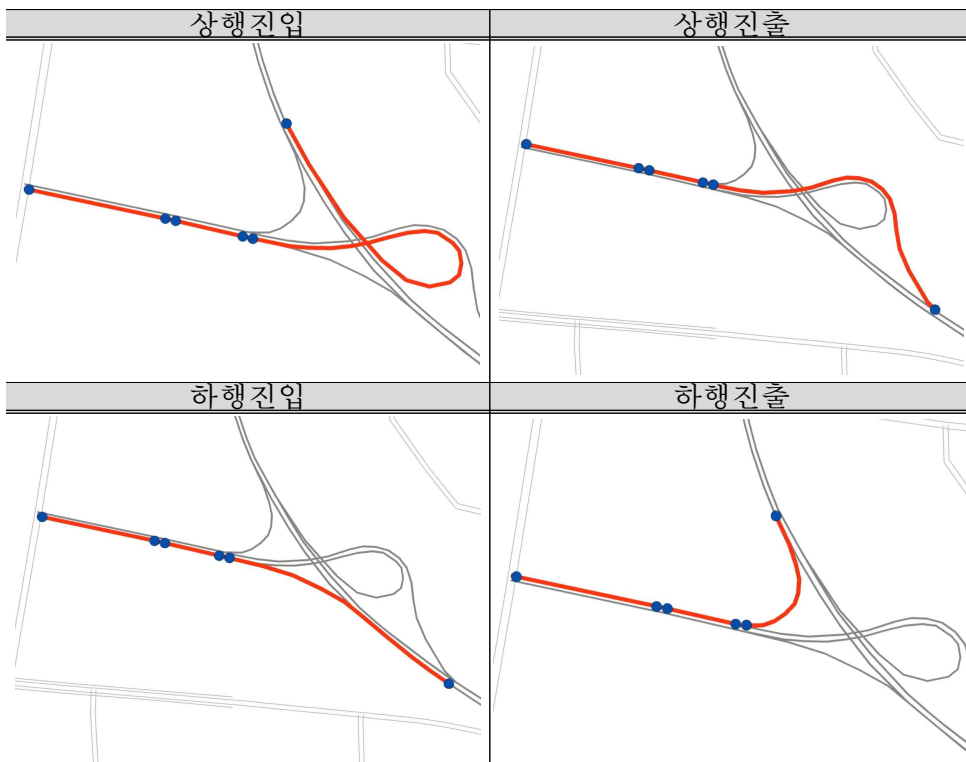
IV. 적용

1. 분석범위 설정 및 데이터

1) 분석범위 설정

본 연구의 분석에는 국가교통통합분석시스템을 이용하여 구득한 5분 단위 링크별 평균 통행속도 자료를 활용하였다. 전국 고속도로 443개 IC를 대상으로 가감속차로부터 하위도로로 연결되는 진출입 램프에 대하여 분석하였다.

<그림 13> 경로 단위 연구 분석범위



<그림 13>과 같이 고속도로 진출입 램프를 구성하는 경로 단위로 지체·혼잡 경계 속도를 도출하고자 한다. 국가교통통합분석시스템에서 링크 단위로 통행속도 자료를 제공하고 있기 때문에 링크 단위로 지체·혼잡 경계 속도를 도출할 수 있지만, 지체·혼잡 경계 속도를 경로 단위로 분석하는 이유는 다음과 같다.

첫째, 지체·혼잡 경계 속도를 경로 단위로 도출할 경우 혼잡할 때 혼잡의 원인을 분석하기에 효과적이다.

혼잡의 원인을 파악하기 위한 방법으로 혼잡의 전과과정을 분석할 수 있다. 만약 이때 혼잡의 기준이 링크 단위로 다르게 분석할 때 예를 들어보면, 상류부 링크는 지체·혼잡 경계 속도가 높게 도출되어 50km/h의 속도도 지체·혼잡이라고 할 때 하류부 링크는 평소 혼잡한 링크로 지체·혼잡 경계 속도가 20km/h로 낮게 도출되었다고 가정한다. 이러한 경우 상류부 링크는 높은 지체·혼잡 경계 속도로 인하여 혼잡이 자주 발생하지만, 하류부 링크는 낮은 지체·혼잡 경계 속도로 인하여 혼잡이 자주 발생하지 않는 현상이 발생할 수 있다. 평소 링크 상의 문제로 혼잡이 자주 발생하여 혼잡에 영향을 주는 링크는 하류부 링크이지만 상류부 링크가 더 혼잡하다고 분석되는 오류를 범할 수 있다.

둘째, 통행속도 자료가 존재하지 않거나 지체·혼잡 경계 속도가 도출되지 않은 링크와 경로에 대해서 혼잡판단 및 원인 분석이 가능하다.

본 연구에서는 연구에 앞서 개별 링크 단위 통행속도 자료를 활용하여 연구 방법론을 통하여 지체·혼잡 경계 속도를 도출하여 보았다. 그 결과 3,151개 링크 중 지체·혼잡 경계 속도가 도출된 링크가 597개로 혼잡이 없는 거나 자료 부족으로 인하여 지체·혼잡 경계 속도가 도출되지 않은 링크가 대다수였다. 이러한 경우 혼잡을 판단할 기준이 없어 혼잡원인 분석도 불가능하며, 혼잡한 구간에 대해서 원인을 파악하기 어렵다. 따라서 경로 단위로 경로에 포함된 개별 링크 단위 통행속도 자료가 취합된 자료를 사용하여 지체·혼잡 경계 속도를 도출하고자 한다.

2) 표준노드링크체계

분석을 위해 국가교통통합분석시스템에서 기반으로 하는 표준노드링크체계를 이용하였다. 표준노드링크체계에 포함된 자료 중 연구에 활용한 자료는 다음 <표 6>, <표 7>과 같다.

<표 6> 표준링크 자료

LINK_ID	F_NODE	T_NODE	LANES	ROAD_RANK	ROAD_NAME	CONNECT	MAX_SPD	SHAPE_STLe
2510366200	2510142600	2510140800	1	101	중앙고속도로	101	50	243
2510366300	2510145800	2510142600	1	101	중앙고속도로연결로	101	50	325
2510366400	2510145800	2510140800	2	101	중앙고속도로	000	100	456
2510366500	2510142600	2510145800	1	101	중앙고속도로연결로	101	50	595
2510366600	2510140800	2510142600	1	101	중앙고속도로	101	40	760
2510366700	2510140800	2510145800	2	101	중앙고속도로	000	100	457
2510387800	2510142700	2510142600	2	101	중앙고속도로연결로	101	50	602
2510387900	2510142600	2510142700	2	101	중앙고속도로연결로	101	50	608
2510388000	2510142700	2510013700	1	101	중앙고속도로연결로	101	50	342
⋮								

표준노드링크 자료는 수정이 있을 경우 갱신되어 ITS 표준노드링크 홈페이지 업로드된다. 본 연구의 분석 대상 기간은 2018년 10월이므로 표준노드링크 자료는 2018년 10월 2일 기준으로 수정되어 업로드된 자료를 활용하였다.

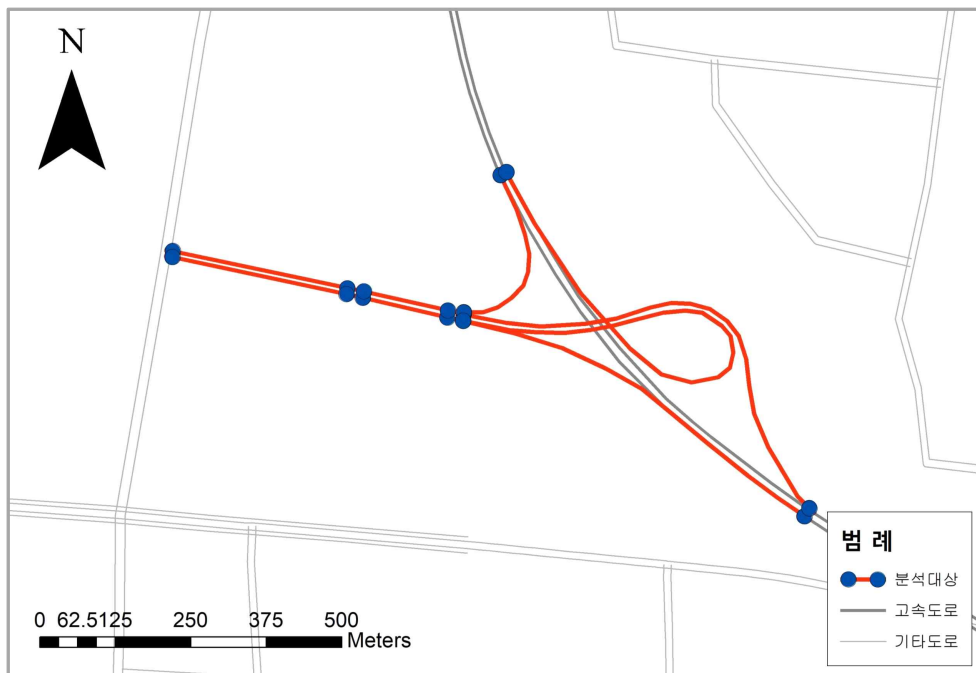
〈표 7〉 표준노드 자료

NODE_ID	NODE_TYPE	NODE_NAME
2510142600	108	남원주IC진입
2510145800	108	남원주IC진출
2510140800	108	남원주IC진출입
3850002000	108	장유IC
3850002300	108	장유IC
3850003700	108	냉정JC
3850003900	108	서김해IC
3850004200	108	냉정JC
3850004100	108	서김해IC
3850004400	108	서김해IC
⋮		

표준노드링크체계는 표준링크 자료와 표준노드 자료로 나뉘어 있다. 표준링크 자료를 먼저 살펴보면 LINK_ID는 각 링크에 부여된 고유의 번호로 10자리 숫자로 구성되어 있다. F_NODE, T_NODE는 표준노드 자료와 매칭을 할 수 있는 자료로 상류부 노드(From Node)와 하류부 노드(To_Node)의 고유한 10자리 숫자로 구성되어 있다. LANES는 차로수이며, ROAD_RANK는 도로 등급으로 도로법상으로 도로를 구분하였으며, ‘101’ ~ ‘108’ 까지 번호 중 ‘101’은 고속도로를 의미한다. ROAD_NAME은 도로명을 의미한다. CONNECT는 연결로 코드로 연결로가 아닌 곳은 ‘000’, 나머지는 도로 등급과 연관 지어 코드가 구성되어 있으며, ‘101’ ~ ‘108’ 까지 번호 중 ‘101’은 고속도로의 연결로(진출입 램프)를 의미한다. MAX_SPD는 제한속도를 의미하며, SHAPE_STLe는 링크 길이를 의미한다.

<그림 14>는 수성 IC를 예시로 표준링크 자료의 분할점을 도면으로 표현한 자료이다. 표준링크 자료의 분할점은 도로의 합류부 또는 분류부 그리고 가감속 차로 또는 영업소 등으로 인한 도로의 속성 변경지점이다.

<그림 14> 표준링크의 분할점 - 수성 IC



분석하고자 하는 진출입 램프 링크 추출은 표준노드링크의 속성정보 중 CONNECT와 ROAD_RANK를 활용하여 추출할 수 있으나, 추출된 링크 중 일부는 JC의 연결로로 본 연구에서는 고속도로 IC에 관한 연구로 고속도로 JC에 대한 링크는 제외하는 작업이 필요하다. 또한, 개별 링크 단위가 아닌 고속도로 진출입 램프를 구성하는 경로 단위로 분석하고자 한다. 따라서 진출입 램프를 구성하고 있는 개별 링크들을 경로 단위로 묶어주는 작업이 필요하다. 위와 같은 2가지 작업은 표준노드링크체계에서 제공하고 있는 자료로는 불가능하다.

3) 고속도로 진출입 램프 번호체계

본 연구에서는 경로 단위 지체·혼잡 경계 속도 도출을 위해 고속도로 443개 IC에 대하여 각 IC를 구성하고 있는 링크에 대한 정보가 경로의 형태로 수록되어 있는 고속도로 진출입 램프 경로에 대한 번호체계자료를 활용하였다. 구축한 번호체계는 다음 <표 8>과 같다.

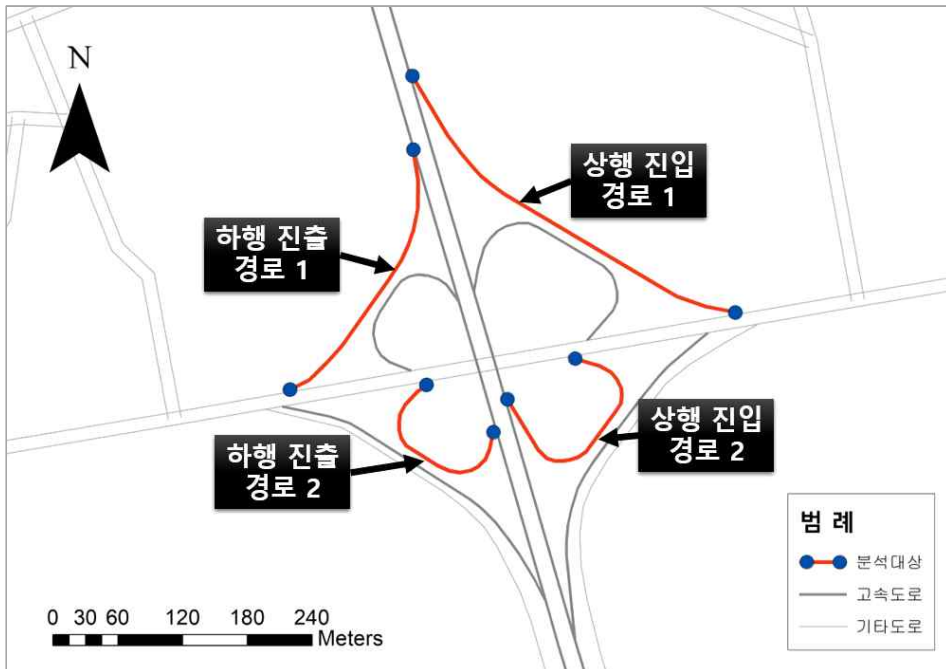
<표 8> 번호체계 자료

IC명칭	노선명	상하행 코드	진출입 코드	진출입 번호	구간코드	접속유형	표준링크ID	링크길이	경로코드
구미	경부선	0	0	1	2	1	3550127000	256	1061
구미	경부선	0	0	1	3	1	3550127900	444	1061
구미	경부선	0	0	1	4	1	3550122700	655	1061
구미	경부선	0	1	1	2	1	3550129500	501	1062
구미	경부선	0	1	1	3	1	3550128400	456	1062
구미	경부선	0	1	1	4	1	3550122800	643	1062
구미	경부선	1	0	1	2	2	3550124800	738	1063
구미	경부선	1	0	1	3	1	3550127900	444	1063
구미	경부선	1	0	1	4	1	3550122700	655	1063
구미	경부선	1	1	1	2	3	3550125300	714	1064
구미	경부선	1	1	1	3	1	3550128400	456	1064
구미	경부선	1	1	1	4	1	3550122800	643	1064
⋮									

상하행 코드는 ‘0’은 상행, ‘1’은 하행을 의미한다. 진출입 코드 ‘0’은 고속도로로 진입하는 링크, ‘1’은 하위도로로 진출하는 링크를 의미한다. 진출입 번호는 기본적으로 ‘1’의 값을 가지며, 입체교차로 중 클로버형 IC와 같이 고속도로로 진입하거나 하위도로로 진출하는

경로가 2개 이상인 경우에는 1씩 숫자가 더해진다. <그림 15>은 클로버형 IC인 서초 IC를 예시로 2가지 진입 또는 진출 경로가 존재할 때를 표현한 도면이다.

<그림 15> 진출입 번호 예시 - 서초 IC



구간코드는 고속도로 진입 경로의 경우 분류부 ~ 가감속차로까지 ‘2’, 영업소 ~ 분류부까지 ‘3’, 하위도로 ~ 영업소까지 ‘4’ 으로 구성된다. 진출 경로의 경우 가감속차로 ~ 합류부까지 ‘2’, 합류부 ~ 영업소까지 ‘3’, 영업소 ~ 하위도로까지 ‘4’ 로 구성된다.

접속유형은 직결형의 경우 ‘1’, 준직결형의 경우 ‘2’, 루프형의 경우 ‘3’ 으로 구성된다.

마지막으로 고속도로 진출입 램프를 구성하고 있는 모든 경로에 대해서 ‘1001’ ~ ‘2662’ 까지 번호를 부여하였다.

번호체계를 이용하여 분석할 링크를 추출한 결과 1,662개 경로에 대한

4,392개 링크가 추출되었다. 상행, 하행 진입과 상행, 하행 진출의 경우 링크가 중복되는 경우가 존재하기 때문에 중복된 항목을 제거한 링크의 수는 3,151개이다. 본 연구에서는 고속도로 진출입 램프를 구성하는 모든 경로에 대해서 분석하였다. 추출한 분석대상 범위는 <그림 13>과 같다.

4) 국가교통통합분석시스템

추출한 3,151개 링크에 대하여 국가교통통합분석시스템을 활용하여 2018년 10월 한 달간의 5분 간격 통행속도 자료를 수집하였으며 수집된 데이터의 예시는 <표 9>과 같다. 번호체계와 매칭을 위한 링크ID와 링크별 km/h 단위의 통행속도 값, m 단위의 링크 길이인 연장으로 구성되어 있다.

<표 9> 국가교통통합분석시스템 자료

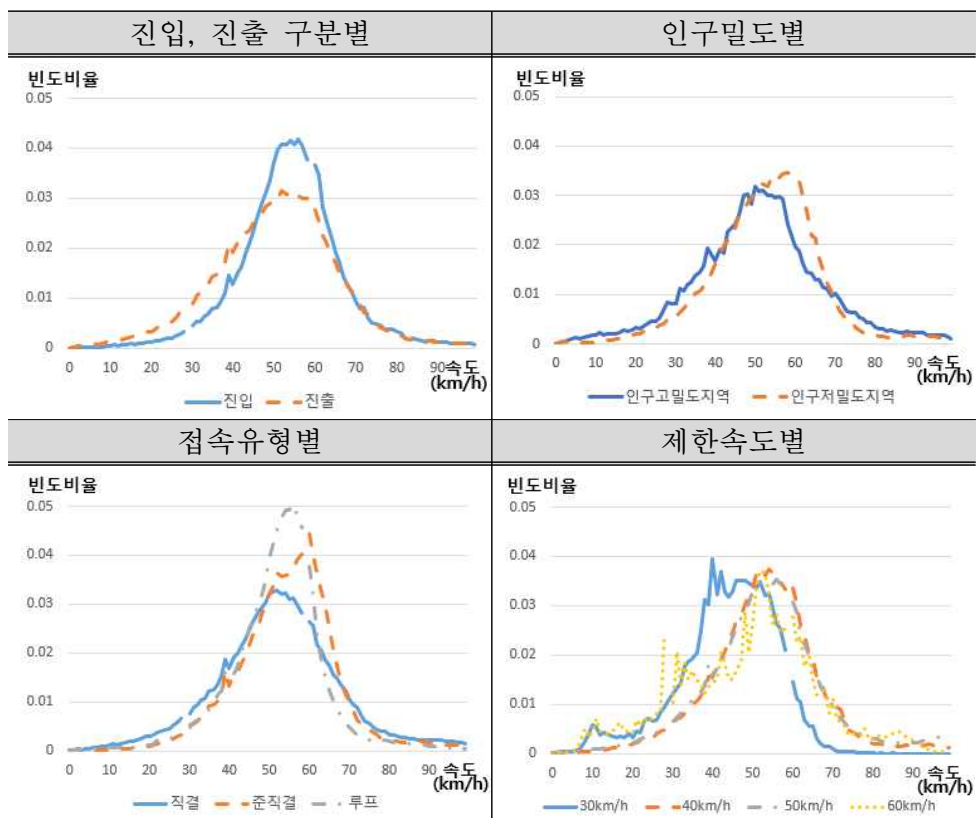
일자	시간	링크ID	연장(m)	통행속도(km/h)
20181001	00:00	1670048300	568	73
20181001	00:05	1670048300	568	65
20181001	00:10	1670048300	568	66
20181001	00:15	1670048300	568	61
20181001	00:20	1670048300	568	60
20181001	00:25	1670048300	568	65
20181001	00:30	1670048300	568	63
20181001	00:35	1670048300	568	58
20181001	00:40	1670048300	568	58
⋮				

국가교통통합분석시스템과 고속도로 진출입 램프 번호체계 자료를 활용한 진출입 램프의 특성에 관한 분석은 <그림 16>과 같다.

진입, 진출별, 인구밀도별, 접속유형별, 제한속도별 속성정보를 활용하여 통행속도의 분포를 나타내는 그래프를 작성하였다.

진입과 진출의 경우 유사한 통행속도 패턴을 보이지만 진출의 경우 분산 값이 더 크게 나타난다. 인구밀도별로 보았을 때 인구 저밀도 지역에 위치한 링크의 경우 통행속도가 낮게 나타난다. 접속유형별로 보았을 때는 루프형의 경우 낮은 분산 값을 보이며 평균은 3가지 모두에서 유사하다. 제한속도별로 보았을 때 대부분 제한속도를 넘어서는 속도 분포를 보이였다. 제한속도가 가장 낮은 30km/h에서 속도가 가장 낮게 나타났으며, 나머지 40km/h, 50km/h, 60km/h에서는 유사한 분포를 보인다.

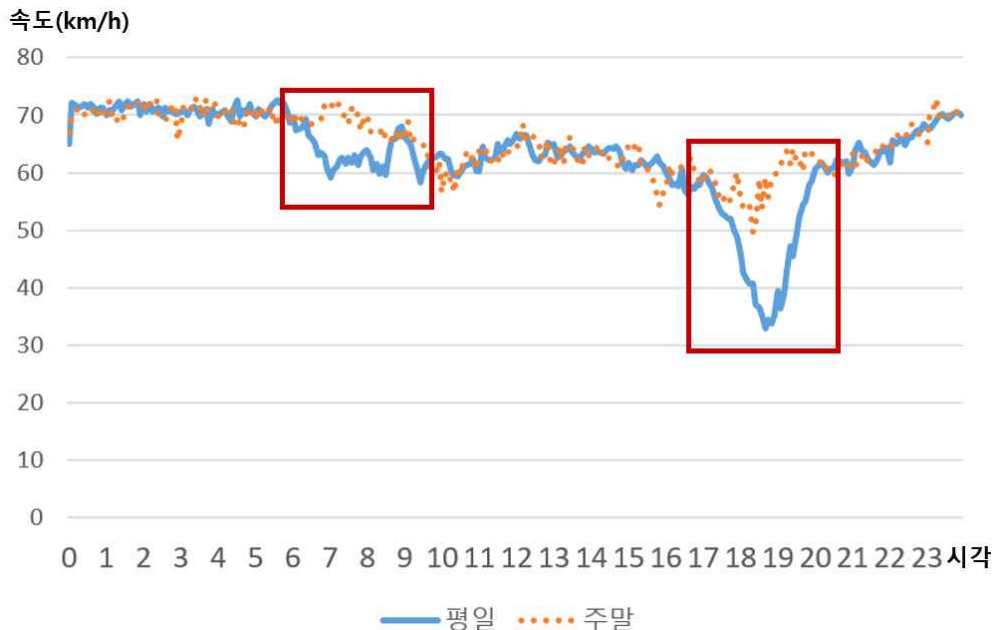
<그림 16> 링크 속성정보별 통행속도 분포



2. 지체·혼잡 경계 속도 도출

분석에 앞서 이상치를 제거하였다. 선행연구 중 정희진 외 2명(2017)에 따르면 자유속도는 제한속도의 약 1.2배라고 할 수 있다고 하였다. 자유속도를 초과하는 경우에는 이상치로 판단하고 제거하였다. 또한, 통행속도가 누락되어 있는 경우 보정하지 않고 주어진 자료만을 활용하여 분석하였다. 이상치 제거 과정을 거쳐 1,662개 경로를 구성하고 있는 3,151개 링크에 대한 통행속도 자료가 가우시안 혼합 모형 적용에 활용되었다. 통행패턴이 서로 다르게 나타나는 주말과 평일을 구분하여 지체·혼잡 경계 속도를 도출하였다.

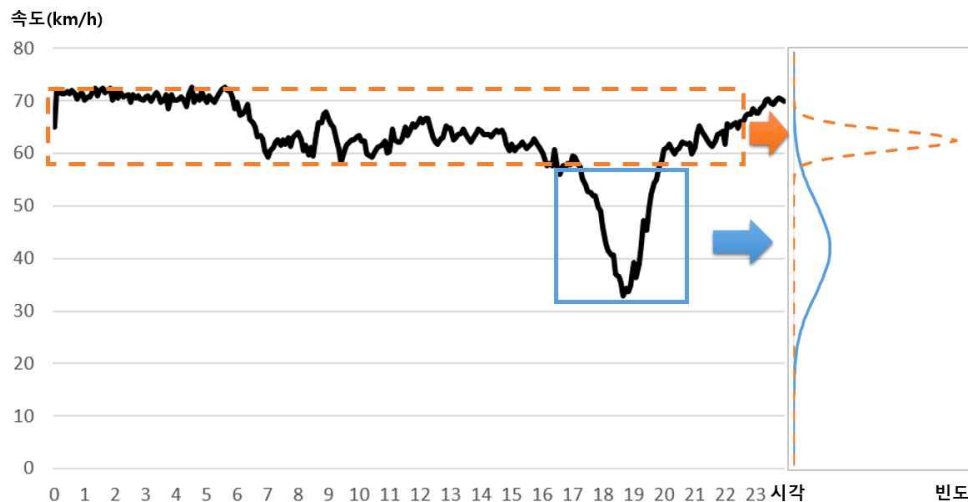
<그림 17> 평일, 주말 통행속도 패턴 비교



<그림 17>은 2018년 10월 한 달 동안의 판교IC 상행 진입 2060272900 링크의 5분 단위 평균 통행속도 자료를 5분 단위별로 평균값을 구하여 그린 그래프이다. 붉은색 상자로 표시된 곳과 같이 평일과 주말은 특히 첨두시간대에 통행속도 패턴이 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 평일과 주말을 분리하여 지체·혼잡 경계 속도를 나누어 도출하였다.

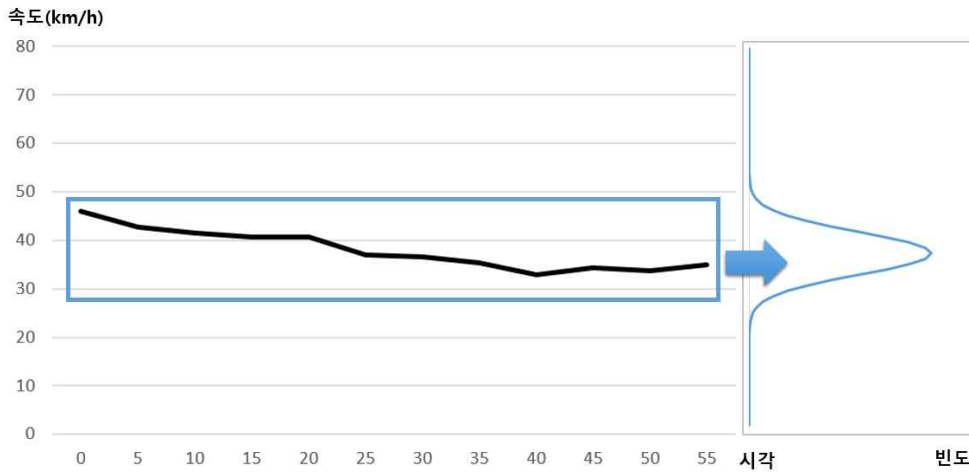
추가적으로 본 연구에서 1시간 단위 또는 첨두, 비첨두 분리 등을 하지 않고 시간을 평일과 주말 단위로 세분한 이유는 다음과 같다.

<그림 18> 첨두, 비첨두 통행속도 가우시안 분포



<그림 18>은 판교IC를 대상으로 2018년 10월 한달 동안의 5분 단위 통행속도 자료로 가우시안 혼합 모형을 활용하여 혼잡과 원활을 구분하는 그림이다. 그림과 같이 17시 ~ 20시 첨두 시간대와 나머지 비첨두 시간대와 통행속도 분포가 달라 오른쪽 그림과 같이 두 가지 분포의 형태로 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

〈그림 19〉 1시간 단위 통행속도 가우시안 분포



〈그림 19〉는 판교IC의 5분 단위자료를 활용하여 1시간 동안의 통행속도 분포를 그린 그래프이다. 〈그림 18〉와는 달리 분포가 분리되지 못하고 1개의 통행속도 분포를 보인다.

가우시안 혼합 모형을 적용하여 지체·혼잡 경계 속도를 도출하기 위해서는 기본적으로 두 가지 또는 그 이상의 통행속도 분포가 존재해야 한다. 만약 1시간 단위 또는 첨두시간 단위로 분석할 경우 가우시안 분포를 이루기 위한 데이터가 부족할 뿐만 아니라 〈그림 19〉와 같이 일정한 속도의 분포를 보여 혼잡과 원활 두 가지 분포로 통행속도 자료를 분류할 수 없다.

이러한 경우 지체·혼잡 경계 속도 자체를 도출할 수 없거나 지체·혼잡 경계 속도를 도출하더라도 소통이 원활한 링크에서는 지나치게 지체·혼잡 경계 속도가 높게 도출되어 혼잡한 링크로 판단될 수 있다. 반대로 소통이 원활하지 않은 링크에서는 지나치게 지체·혼잡 경계 속도가 느리게 도출되어 혼잡하지 않은 링크로 판단될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 평일과 주말로만 시간을 분리하여 지체·혼잡 경계 속도를 도출하였다.

고속도로 진출입 램프 1,662개 경로를 구성하고 있는 3,151개 링크에 대한 5분 단위 평균 통행속도 자료를 활용하였다. 평일은 약 22,400,000개의 자료를 활용하였으며, 주말은 약 7,920,000개의 자료를 활용하여 분석하였다.

<표 10> 경로별 링크 클러스터링

경로코드	1081	1082	1083	1084	1085	1086	...
링크ID	2770313700	2770313900	2770314000	2770313600	2760278300	2760278400	...
	2770313400	2770313500	2770313400	2770313500	2760278800	2760278700	
	2770313200	2770313300	2770313200	2770313300	2760279400	2760279300	
					2760280000	2760279900	

경로 단위 지체·혼잡 경계 속도 분석을 위해 <표 10>과 같이 경로에 해당되는 링크들을 진출입 램프 번호체계 자료를 활용하여 클러스터링하였다. 클러스터링 방법은 다음과 같다. IC명칭, 노선명, 상하행, 진출입, 진출입번호를 하나의 코드로 묶어 중복된 항목을 제거하여 각각의 IC에 대한 상행 진입·진출, 하행 진입·진출 경로를 만들었다. 이 경로에 대하여 각각 ‘1001’ ~ ‘2662’까지의 고유의 경로 번호를 부여한 뒤 각 링크들이 가지고 있는 IC명칭, 노선명 등의 자료를 이용해 고유의 경로 번호를 부여하여 위의 <표 10>과 같이 정리하였다.

가우시안 혼합 모형을 적용하기 위하여 경로에 포함된 개별 링크의 5분 단위 평균 통행속도 자료를 경로를 기준으로 클러스터링하였고, 가우시안 혼합 모형에 적용하였다.

가우시안 혼합 모형은 R의 Mclust 패키지를 활용하여 구축하였으며, 가우시안 혼합 모형을 통해 도출된 평균속도(μ_k), 분산(σ_k^2), 혼합계수(π_k)를 이용하여 교차점을 찾기 위한 두 개의 가우시안 분포 그래프를 정의

하였다. 교차점을 찾기 위해서 R의 uniroot 함수를 이용하여 구하였다. uniroot 함수는 수식의 해를 찾아 주는 함수이다.

지체·혼잡 경계 속도를 구하기 위해서는 TPI를 적용하여 군집을 분류해야 하는데, 이때 TPI를 활용하기 위해서는 자유속도가 필요하다. 제한속도의 1.2배를 일반적으로 자유속도로 산출할 수 있어 때문에 경로별 제한속도 자료가 필요하다. 경로를 구성하는 개별 링크들의 제한속도가 다른 경우가 있을 수 있어, 링크의 길이를 활용하여 제한속도를 가중평균하여 <표 11>과 같이 경로 단위 제한속도를 도출하였다.

<표 11> 경로별 제한속도

경로코드	제한속도(km/h)	경로코드	제한속도(km/h)
1001	50	1005	50
1002	80	1006	50
1003	50	1007	50
1004	50	1008	50
⋮			

가우시안 혼합 모형을 적용한 결과 1,662개 경로 중 평일은 1,592개, 주말은 1,571개 경로에 대해서 분석이 가능하였다. 나머지 경로에 대해서는 통행속도 값이 없는 것으로 나타났다. 분석 결과 중 원활한 군집을 가진 경로는 평일 1,572개, 주말 1,564개로 나타났다. 지체인 군집을 가진 경로는 평일 999개, 주말 923개로 나타났으며, 혼잡인 군집을 가진 경로는 평일 252개, 주말 210개로 분석되었다.

<표 12> 가우시안 혼합 모형 적용 결과

구분	전체 경로 수	분석 가능 경로	원활 군집	지체 군집	혼잡 군집
평일	1,662	1,592	1,572	999	252
주말	1,662	1,571	1,564	923	210

1) 혼잡 경계 속도 도출 결과

가우시안 혼잡 모형을 적용한 결과 1,662개 경로 중 평일의 경우 252개, 주말의 경우 210개 경로에 대해서 혼잡 경계 속도를 도출할 수 있었다. 혼잡 경계 속도는 혼잡과 지체, 혼잡과 원활 두 가지 군집의 교차점에서 도출될 수 있다. <표 13>에서 평일 군집에 혼잡의 경우 지체 혹은 원활 군집과의 교차점을 가지는 혼잡한 군집의 기초통계량이며 평일 군집에 지체는 혼잡 군집과 교차점을 가지는 지체 군집의 기초통계량이다. 평일 군집에 원활의 경우 지체 군집이 존재하지 않을 때 혼잡 군집과의 교차점을 가지고 있는 원활 군집의 기초통계량이다.

<표 13> 평일, 주말 군집별 기초통계량 - 혼잡 경계 속도

단위 : km/h

구분	평일 군집			주말 군집		
	혼잡	지체	원활	혼잡	지체	원활
최대값	25.1	51.5	55.5	22.8	45.6	81.2
최소값	3.5	12.3	38.0	2.6	15.1	28.1
중앙값	13.5	28.1	47.3	12.9	28.7	47.8
평균	13.1	28.1	47.4	12.8	28.3	47.4
표준편차	3.4	4.5	4.8	3.9	5.0	7.1
군집수(개)	252	215	37	210	167	43

〈표 13〉에서 확인할 수 있는 것처럼 평일의 경우 주말에 비해서 표준편차가 작게 나타나고 있는데, 주말에 비해 평일은 소통상황이 경로 별로 큰 차이를 보이지 않고 있다. 평일의 경우 혼잡한 군집을 가진 경로가 주말보다 많으며, 이는 출퇴근 시간에 혼잡으로 인한 것으로 보인다. 최댓값과 최솟값의 경우 혼잡 경계 속도가 도출된 경로의 속성에 따라 크게 좌우될 수 있는 값으로 주말과 평일의 차가 크게 나타난다.

〈표 14〉는 평일과 주말의 혼잡 경계 속도에 대한 기초통계량이다. 평일과 주말 혼잡 경계 속도가 도출된 경로는 총 462개이며, 평일과 주말 모두 혼잡 경계 속도를 가지고 있어 중복된 경로는 145개로 나타났다. 따라서 평일 기준 252개 경로 중 107개 경로 즉, 전체의 42%에 해당되는 경로가 주말에는 혼잡하지 않은 것으로 나타나 평일과 주말의 혼잡이 발생하는 경로가 다른 것으로 나타났다. 평일이 주말에 비해 표준편차가 작게 나타나고 있어 경로별로 유사한 혼잡 경계 속도를 보였다.

〈표 14〉 평일, 주말 혼잡 경계 속도 기초통계량

단위 : km/h

구분	평일 혼잡 경계 속도	주말 혼잡 경계 속도
최댓값	43.1	63.1
최솟값	6.7	4.5
중앙값	20.2	20.6
평균	20.7	21.0
표준편차	6.1	7.1
혼잡 경계 속도 도출 경로(개)	252	210
평일, 주말 중복 경로(개)	145	

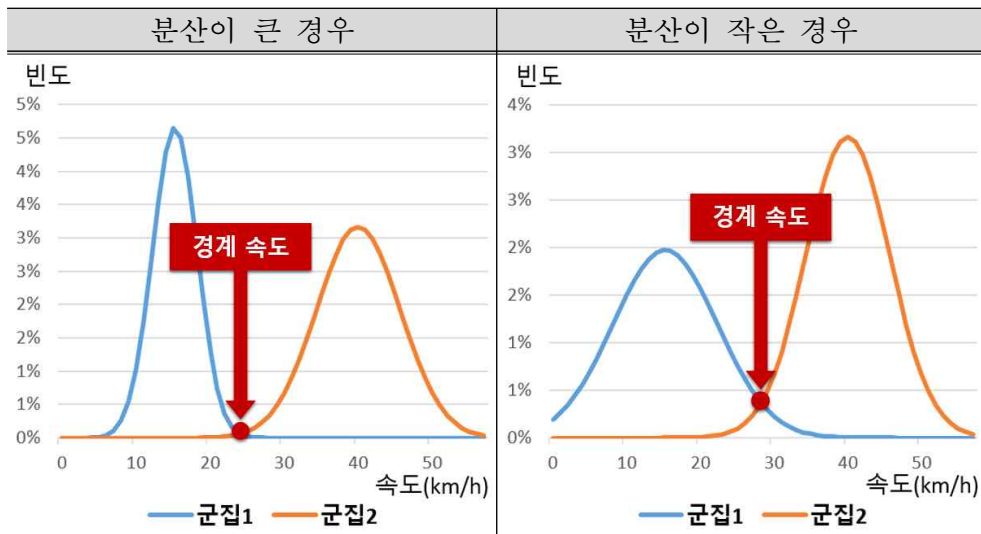
<표 15>는 혼잡, 지체의 교차점, 혼잡, 원활의 교차점으로 혼잡 경계 속도를 나누어 정리한 자료이다. <표 15>를 보면 평일과 주말 혼잡 경계 속도 값의 최댓값은 각각 43.1km/h 63.1km/h로 높게 나타나고 있다. 이러한 경우 지체 군집이 나타나지 않는 경로로 혼잡의 분산 값이 증가하여 <그림 20>과 같이 원활한 쪽으로 교차점 이동한 것이 원인으로 분석된다.

<표 15> 교차점별 혼잡 경계 속도 기초통계량

단위 : km/h

구분	평일		주말	
	혼잡, 지체 교차점	혼잡, 원활 교차점	혼잡, 지체 교차점	혼잡, 원활 교차점
최댓값	37.0	43.1	30.6	63.1
최솟값	6.7	17.6	4.5	17.0
중앙값	19.6	30.5	19.3	27.6
평균	19.0	30.7	18.8	29.8
표준편차	4.2	6.0	4.5	8.5
혼잡 경계 속도 도출 경로(개)	215	37	167	43

<그림 20> 분산 값에 따른 교차점



위와 같은 결과에 대하여 중복 경로와 평일 또는 주말만 도출된 경로를 나누어 다음과 같이 분석하였다. 분석에는 표준노드링크자료의 권역 코드와 2018년 기준 통계청 시군구 인구밀도 자료를 활용하였다.

<표 16>은 평일과 주말 중복으로 혼잡 경계 속도가 도출된 경로와 평일 또는 주말만 혼잡 경계 속도가 도출된 경로에 대한 기초통계량이다. 본 연구에서 경계 속도를 두 가우시안 모형의 교차점으로 정의하였다. 혼잡한 군집의 경우 원할 또는 지체보다 작은 군집으로 나타난다. 혼잡한 군집에 자료가 많이 존재하지 않아 분산 값이 크게 도출된 경우 교차점은 <그림 20>과 같이 지체 또는 원할의 방향으로 이동하게 된다. 따라서 혼잡이 자주 발생하는 중복링크의 경우 혼잡 경계 속도의 값이 더 낮고 작은 편차를 가지는 것으로 나타나고 있다.

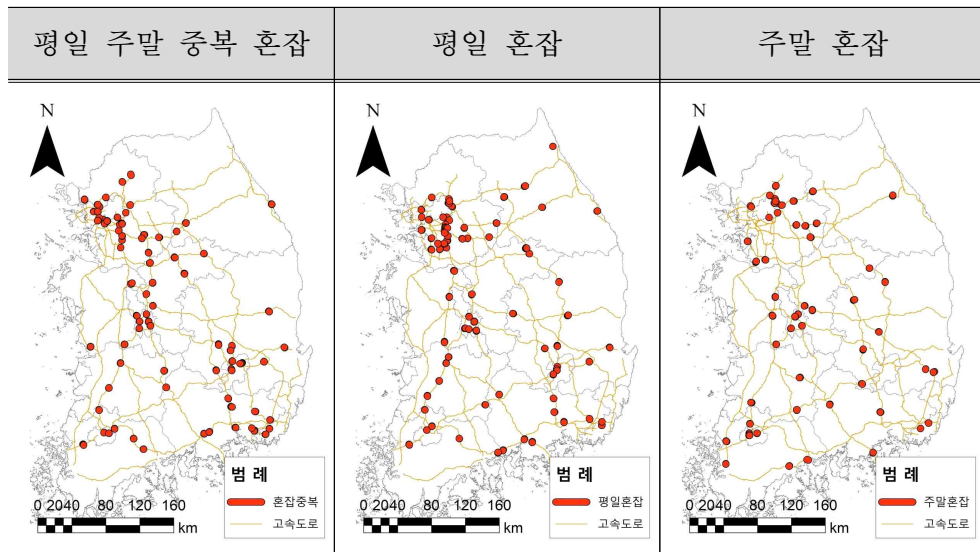
<표 16> 평일, 주말, 중복 혼잡 경계 속도 기초통계량

단위 : km/h

구분	평일 중복 혼잡	주말 중복 혼잡	평일 혼잡	주말 혼잡
최댓값	41.4	41.6	43.1	63.1
최솟값	6.7	4.5	10.1	9.3
중앙값	19.8	20.6	21.6	22.4
평균	19.8	20.6	22.4	24.4
표준편차	5.6	5.9	7.0	11.8
도출 경로(개)	145		107	65

<그림 21>은 평일과 주말 모두 혼잡 경계 속도가 도출된 경로와 평일 또는 주말만 혼잡 경계 속도가 도출된 경로를 도면화한 자료이다. 평일, 주말 중복 혼잡과 평일 혼잡의 경우 주말 혼잡에 비하여 대도시권에 집중되어 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

<그림 21> 평일, 주말 혼잡 경로 분석



<표 17>은 <그림 21>의 내용을 뒷받침 할 수 있는 자료로 평일 주말 중복 혼잡 경로의 경우 가장 인구밀도가 높은 곳에 위치하고 있으며, 평일 혼잡, 주말 혼잡 순으로 인구밀도가 높은 것으로 나타났다.

<표 17> 평일, 주말 혼잡 경로 인구밀도

단위 : 명/km ²			
구분	평일 주말 중복 혼잡	평일 혼잡	주말 혼잡
인구밀도	2468.8	2147.6	1683.7

<표 18>은 전국을 5대 권역으로 나누어 각 권역별로 혼잡 경계 속도가 도출된 경로의 수를 정리한 자료이다. 여기서 각 권역별 도출된 경로의 수를 비교하고자 할 때 권역별 경로의 절대적인 숫자가 다르기 때문에 <표 19>와 같이 권역별 총 경로 수에 대한 비율로 계산하였다. 결과적으로 인구가 밀집되어 있는 수도권이 다른 권역에 비해 혼잡 경계 속

도가 도출된 경로의 비율이 높은 것으로 나타났다. 다른 권역은 평일 혼잡에 비해 중복 혼잡 경로가 더 많지만, 강원권의 경우 중복 혼잡 경로가 더 적은 것으로 나타나고 있어, 평일과 주말에 따라 혼잡이 발생하는 경로가 다른 권역에 비해 다르다. 이는 관광지가 많은 강원도의 특성상 주말에 평일과는 다른 곳에 교통량이 집중되어 혼잡이 발생하는 것으로 보인다.

〈표 18〉 권역별 평일, 주말 혼잡 경로 분석

구분	중복 혼잡	평일 혼잡	주말 혼잡	합계	총 경로
수도권	44	42	21	107	415
강원권	6	7	3	16	135
충청권	33	17	14	64	294
경상권	44	25	14	83	521
전라권	18	16	13	47	297

〈표 19〉 권역별 평일, 주말 혼잡 경로 비율 분석

구분	중복 혼잡(%)	평일 혼잡(%)	주말 혼잡(%)	합계(%)
수도권	10.6	10.1	5.1	25.8
강원권	4.4	5.2	2.2	11.9
충청권	11.2	5.8	4.8	21.8
경상권	8.4	4.8	2.7	15.9
전라권	6.1	5.4	4.4	15.8

(1) 평일 혼잡 경계 속도

적용 결과 평일 혼잡 경계 속도는 1,662개 경로 중 252개 경로에 대하여 혼잡 경계 속도를 도출할 수 있었다. 나머지 1,410개 경로의 경우 혼잡한 군집이 존재하지 않아 혼잡이 없는 것으로 판단되었다. 252개의 혼잡 경계 속도 중에서 215개는 혼잡과 지체 군집의 교차점이며 나머지 37개는 혼잡과 원활 군집의 교차점으로 도출되었다. 도출한 경로별 혼잡 경계 속도는 <표 20>과 같다.

<표 20> 평일 경로별 혼잡 경계 속도

경로코드	혼잡 경계 속도(km/h)	경로코드	혼잡 경계 속도(km/h)
1002	23	1062	19
1004	17	1064	21
1008	19	1089	22
1037	17	1090	20
1038	14	1091	22
1039	18	1092	20
1040	18	1093	23
1058	20	1095	23
⋮			

고속도로 진출입 램프 경로 코드별로 도출된 혼잡 경계 속도를 고속도로 진출입 램프 번호체계 자료를 활용하게 되면 <표 21>과 같이 직관적으로 어떤 노선의 IC의 상하행, 진출입 경로 단위로 혼잡 경계 속도 값이 얼마인지 파악할 수 있다.

<표 21> 번호체계 활용 평일 경로별 혼잡 경계 속도

IC명칭	노선명	상하행	진출입	진출입 번호	경로코드	혼잡 경계 속도(km/h)
구서	경부선	상행	진입	1	1002	17
구서	경부선	상행	진입	1	1004	19
노포	경부선	상행	진입	1	1008	18
영천	경부선	상행	진입	1	1037	18
영천	경부선	상행	진입	1	1038	12
영천	경부선	상행	진입	1	1039	19
영천	경부선	상행	진입	1	1040	19
남구미	경부선	상행	진입	1	1058	21
구미	경부선	상행	진입	1	1062	22
구미	경부선	상행	진입	1	1064	23
대전	경부선	상행	진입	1	1089	24
대전	경부선	상행	진입	1	1090	25
대전	경부선	상행	진입	1	1091	26
대전	경부선	상행	진입	1	1092	27
신탄진	경부선	상행	진입	1	1093	28
신탄진	경부선	상행	진입	1	1095	29
⋮						

(2) 주말 혼잡 경계 속도

적용 결과 주말 혼잡 경계 속도는 1,662개 경로 중 210개 경로에 대하여 혼잡 경계 속도를 도출할 수 있었다. 나머지 1,452개 경로의 경우 혼잡한 군집이 존재하지 않아 혼잡이 없는 것으로 판단되었다. 210개의 혼잡 경계 속도 중에서 167개는 혼잡과 지체 군집의 교차점이며 나머지 43개는 혼잡과 원활 군집의 교차점으로 도출되었다. 도출한 경로별 혼잡 경계 속도는 <표 22>와 같다.

<표 22> 주말 경로별 혼잡 경계 속도

경로코드	혼잡 경계 속도(km/h)	경로코드	혼잡 경계 속도(km/h)
1007	17	1090	20
1032	27	1092	21
1036	23	1093	23
1037	17	1094	17
1038	19	1095	23
1040	19	1096	17
1062	15	1106	37
1064	19	1108	34
⋮			

고속도로 진출입 램프 경로 코드별로 도출된 혼잡 경계 속도를 고속도로 진출입 램프 번호체계 자료를 활용하게 되면 <표 23>과 같이 직관적으로 어떤 노선의 IC의 상하행, 진출입 경로 단위로 혼잡 경계 속도 값이 얼마인지 파악할 수 있다.

<표 23> 번호체계 활용 주말 경로별 혼잡 경계 속도

IC명칭	노선명	상하행	진출입	진출입 번호	경로코드	혼잡 경계 속도(km/h)
노포	경부선	하행	진입	1	1007	23
경주	경부선	하행	진출	1	1032	17
진천	경부선	하행	진출	1	1036	19
영천	경부선	상행	진입	1	1037	17
영천	경부선	상행	진출	1	1038	14
영천	경부선	하행	진출	1	1040	18
구미	경부선	상행	진출	1	1062	18
구미	경부선	하행	진출	1	1064	20
대전	경부선	상행	진출	1	1090	19
대전	경부선	하행	진출	1	1092	21
신탄진	경부선	상행	진입	1	1093	22
신탄진	경부선	상행	진출	1	1094	20
신탄진	경부선	하행	진입	1	1095	22
신탄진	경부선	하행	진출	1	1096	20
목천	경부선	상행	진출	1	1106	23
목천	경부선	하행	진출	1	1108	23
⋮						

2) 지체 경계 속도 도출 결과

가우시안 혼합 모형을 적용한 결과 1,662개 경로 중 평일의 경우 982개, 주말의 경우 910개 경로에 대해서 지체 경계 속도를 도출할 수 있었다. 지체 경계 속도는 지체와 원활 두 가지 군집의 교차점에서 도출될 수 있다. <표 24>에서 평일 군집에 지체의 경우 원활 군집과의 교차점을 가지는 지체 군집의 기초통계량이며, 평일 군집에 원활은 지체 군집과 교차점을 가지는 원활 군집의 기초통계량이다.

<표 24> 평일, 주말 군집별 기초통계량 - 지체 경계 속도

단위 : km/h

구분	평일 군집		주말 군집	
	지체	원활	지체	원활
최댓값	51.5	79.3	50.0	80.1
최솟값	12.3	27.3	13.7	28.1
중앙값	29.5	47.5	29.1	47.9
평균	29.1	47.1	28.7	47.6
표준편차	5.1	6.0	5.2	6.2
군집수(개)	982		910	

<표 24>에서 확인할 수 있는 것처럼 평일의 경우 주말에 비해서 표준편차가 작게 나타나고 있는데, 주말에 비해 평일은 소통상황이 경로 별로 큰 차이를 보이지 않고 있다. 평일의 경우 지체인 군집을 가진 경로가 주말보다 많으며, 이는 출퇴근 시간에 지체로 인한 것으로 보인다.

〈표 25〉는 평일과 주말의 지체 경계 속도에 대한 기초통계량이다. 평일과 주말 지체 경계 속도가 도출된 경로는 총 1,892개이며, 평일과 주말 모두 지체 경계 속도를 가지고 있어 중복된 경로는 742개로 나타났다. 따라서 평일 기준 982개 경로 중 240개 경로 즉, 전체의 24%에 해당되는 경로가 주말에는 지체가 나타나지 않은 것으로 분석되어, 평일과 주말의 지체가 발생하는 경로가 유사하지만, 어느 정도 차이가 존재하는 것으로 나타났다. 평일이 주말에 비해 표준편차가 작게 나타나고 있어 경로별로 유사한 지체 경계 속도를 보였다.

〈표 25〉 평일, 주말 지체 경계 속도 기초통계량

단위 : km/h

구분	평일 지체 경계 속도	주말 지체 경계 속도
최댓값	73.8	71.9
최솟값	21.2	21.2
중앙값	39.1	39.2
평균	39.1	39.3
표준편차	5.9	6.3
지체 경계 속도 도출 경로(개)	982	910
평일, 주말 중복 경로(개)	742	

혼잡 경계 속도와 마찬가지로 평일, 주말 중복 경로와 평일 또는 주말만 도출된 경로를 나누어 분석하였다. 분석에는 표준노드링크자료의 권역코드와 2018년 기준 통계청 시군구 인구밀도 자료를 활용하였다.

<표 26>은 평일과 주말 중복으로 지체 경계 속도가 도출된 경로와 평일 또는 주말만 지체 경계 속도가 도출된 경로에 대한 기초통계량이다. 본 연구에서 경계 속도를 두 가우시안 모형의 교차점으로 정의하였다. 지체 군집의 경우 대부분 원활 군집보다 작은 군집으로 나타난다. 지체인 군집에 자료가 많이 존재하지 않아 분산 값이 크게 도출된 경우 교차점은 <그림 20>에서 설명한 바와 같이 원활의 방향으로 이동하게 된다. 따라서 지체가 자주 발생하는 중복링크의 경우 지체 경계 속도의 값이 더 낮고 작은 편차를 가지는 것으로 나타나고 있다.

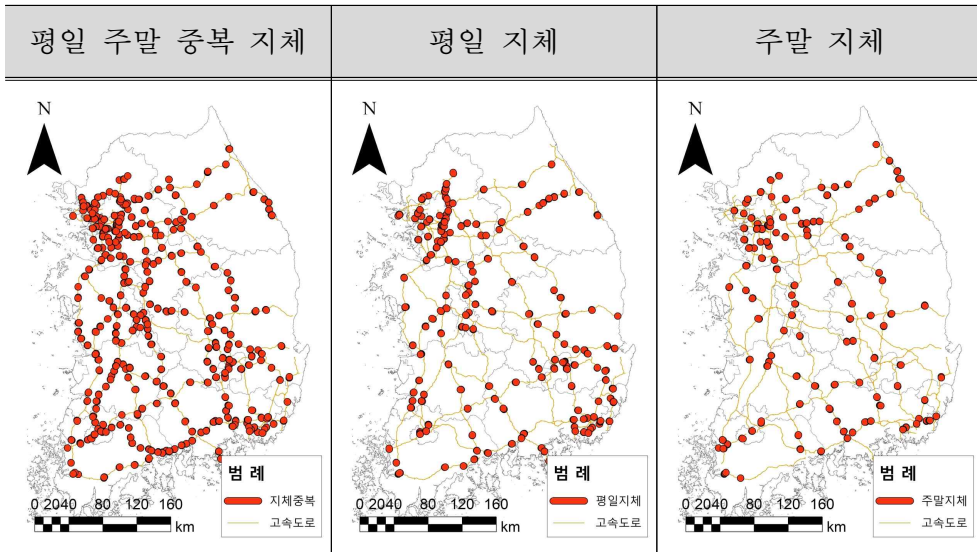
<표 26> 평일, 주말, 중복 지체 경계 속도 기초통계량

단위 : km/h

구분	평일 중복 지체	주말 중복 지체	평일 지체	주말 지체
최대값	65.6	71.9	73.8	71.1
최소값	21.2	21.2	23.2	26.5
중앙값	39.0	39.1	40.0	40.2
평균	38.9	39.1	40.2	40.4
표준편차	5.8	6.3	6.8	6.6
도출 경로(개)	742		628	459

<그림 22>는 평일과 주말 모두 지체 경계 속도가 도출된 경로와 평일 또는 주말만 지체 경계 속도가 도출된 경로를 도면화한 자료이다. 평일, 주말 중복 지체와 평일 지체의 경우 주말 지체에 비하여 대도시권에 집중되어 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

<그림 22> 평일, 주말 지체 경로 분석



<표 27>은 <그림 22>의 내용을 뒷받침 할 수 있는 자료로 평일 주말 중복 지체 경로의 경우 가장 인구밀도가 높은 곳에 위치하고 있으며, 평일 지체, 주말 지체 순으로 인구밀도가 높은 것으로 나타났다.

<표 27> 평일, 주말 지체 경로 인구밀도

단위 : 명/km ²			
구분	평일 주말 중복 지체	평일 지체	주말 지체
인구밀도	1681.0	1452.0	1328.7

<표 28>은 전국을 5대 권역으로 나누어 각 권역별로 지체 경계 속도가 도출된 경로의 수를 정리한 자료이다. 여기서 각 권역별 도출된 경로의 수를 비교하고자 할 때 권역별 경로의 절대적인 숫자가 다르기 때문에 <표 29>와 같이 권역별 총 경로 수에 대한 비율로 계산하였다. 그 결과 경상권, 전라권에서 지체 경계 속도 도출된 링크가 많은 것으로 나타났다. 수도권, 충청권의 경우 혼잡 경계 속도가 다른 권역에 비해 많았

지만, 지체 경계 속도가 도출된 경로는 적은 것으로 나타났다. 수도권과 충청권의 경우 출퇴근 통행으로 인하여 특정 시간대에 통행량이 집중되어, 지체를 거치지 않고 혼잡한 소통상황으로 바뀌는 경우가 존재하기 때문인 것으로 보인다. 강원권의 경우 중복 지체 경로가 없는 것으로 나타나고 있어, 평일과 주말에 따라 지체가 발생하는 경로가 다르다. 이는 관광지가 많은 강원도의 특성상 주말은 관광지와 관련된 통행, 평일은 출퇴근과 관련된 통행이 많은 것에 기인한 것으로 보인다.

<표 28> 권역별 평일, 주말 지체 경로 분석

구분	중복 지체	평일 지체	주말 지체	합계	총 경로
수도권	13	61	52	126	415
강원권	0	18	19	37	135
충청권	13	39	23	75	294
경상권	69	86	47	202	521
전라권	50	35	27	112	297

<표 29> 권역별 평일, 주말 지체 경로 비율 분석

구분	중복 지체(%)	평일 지체(%)	주말 지체(%)	합계(%)
수도권	3.1	14.7	12.5	30.4
강원권	0.0	13.3	14.1	27.4
충청권	4.4	13.3	7.8	25.5
경상권	13.2	16.5	9.0	38.8
전라권	16.8	11.8	9.1	37.7

(1) 평일 지체 경계 속도

적용 결과 평일 지체 경계 속도는 1,662개 경로 중 982개 경로에 대하여 지체 경계 속도를 도출할 수 있었다. 나머지 680개 경로의 경우 지체인 군집이 존재하지 않거나, 8개 경로의 경우에서 지체인 군집은 있으나 원활한 군집이 존재하지 않아 지체 경계 속도를 도출할 수 없었다. 도출한 경로별 지체 경계 속도는 <표 30>과 같다.

<표 30> 평일 경로별 지체 경계 속도

경로코드	지체 경계 속도(km/h)	경로코드	지체 경계 속도(km/h)
1002	52	1028	34
1003	26	1029	52
1004	50	1031	50
1007	38	1033	42
1013	31	1034	45
1025	33	1035	40
1026	31	1036	42
1027	34	1037	34
⋮			

고속도로 진출입 램프 경로 코드별로 도출된 지체 경계 속도를 고속도로 진출입 램프 번호체계 자료를 활용하게 되면 <표 31>과 같이 직관적으로 어떤 노선의 IC의 상하행, 진출입 경로 단위로 지체 경계 속도 값이 얼마인지 파악할 수 있다.

<표 31> 번호체계 활용 평일 경로별 지체 경계 속도

IC명칭	노선명	상하행	진출입	진출입 번호	경로코드	지체 경계 속도(km/h)
구서	경부선	상행	진입	1	1002	52
구서	경부선	상행	진입	1	1003	26
구서	경부선	상행	진입	1	1004	50
노포	경부선	상행	진입	1	1007	38
통도사 (하이패스)	경부선	상행	진입	1	1013	31
활천	경부선	상행	진입	1	1025	33
활천	경부선	상행	진입	1	1026	31
활천	경부선	상행	진입	1	1027	34
활천	경부선	상행	진입	1	1028	34
경주	경부선	상행	진입	1	1029	52
경주	경부선	상행	진입	1	1031	50
건천	경부선	상행	진입	1	1033	42
건천	경부선	상행	진입	1	1034	45
건천	경부선	상행	진입	1	1035	40
건천	경부선	상행	진입	1	1036	42
영천	경부선	상행	진입	1	1037	34
⋮						

(2) 주말 지체 경계 속도

적용 결과 주말 지체 경계 속도는 1,662개 경로 중 910개 경로에 대하여 지체 경계 속도를 도출할 수 있었다. 나머지 752개 경로의 경우 지체인 군집이 존재하지 않거나, 7개 경로의 경우에서 지체인 군집은 있으나 원활한 군집이 존재하지 않아 지체 경계 속도를 도출할 수 없었다. 도출한 경로별 지체 경계 속도는 <표 32>와 같다.

<표 32> 주말 경로별 지체 경계 속도

경로코드	지체 경계 속도(km/h)	경로코드	지체 경계 속도(km/h)
1002	59	1037	34
1004	52	1038	36
1019	42	1039	51
1026	32	1040	36
1028	31	1042	34
1034	40	1044	31
1035	42	1046	39
1036	48	1048	39
⋮			

고속도로 진출입 램프 경로 코드별로 도출된 지체 경계 속도를 고속도로 진출입 램프 번호체계 자료를 활용하게 되면 <표 33>과 같이 직관적으로 어떤 노선의 IC의 상하행, 진출입 경로 단위로 지체 경계 속도 값이 얼마인지 파악할 수 있다.

<표 33> 번호체계 활용 주말 경로별 지체 경계 속도

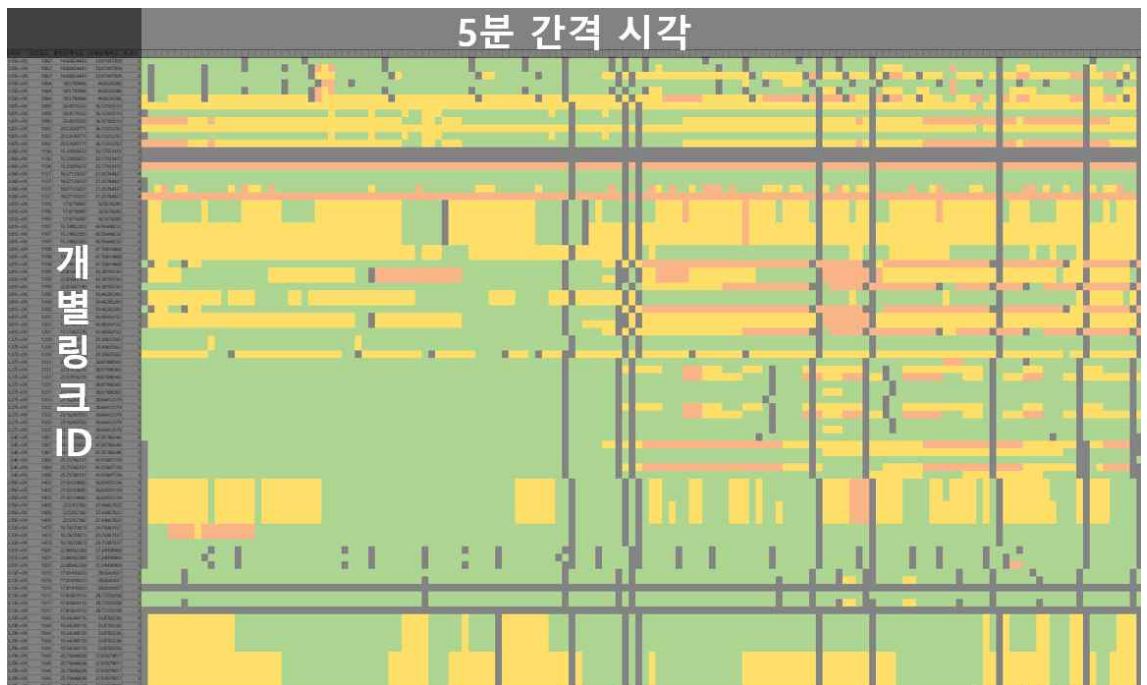
IC명칭	노선명	상하행	진출입	진출입 번호	경로코드	지체 경계 속도(km/h)
구서	경부선	상행	진출	1	1002	59
구서	경부선	하행	진출	1	1004	52
통도사	경부선	하행	진입	1	1019	42
활천	경부선	상행	진출	1	1026	32
활천	경부선	하행	진출	1	1028	31
건천	경부선	상행	진출	1	1034	40
건천	경부선	하행	진입	1	1035	42
건천	경부선	하행	진출	1	1036	48
영천	경부선	상행	진입	1	1037	34
영천	경부선	상행	진출	1	1038	36
영천	경부선	하행	진입	1	1039	51
영천	경부선	하행	진출	1	1040	36
경산	경부선	상행	진출	1	1042	34
경산	경부선	하행	진출	1	1044	31
북대구	경부선	상행	진출	1	1046	39
북대구	경부선	하행	진출	1	1048	39
⋮						

3. 혼잡원인 분석

1) 혼잡 링크 표출

본 연구에서는 추가적으로 도출된 경로 단위 지체·혼잡 경계 속도를 개별 링크에 적용하여, 지체와 혼잡을 판단하고 혼잡원인 분석을 하였다. 혼잡한 IC를 대상으로 사례분석을 하여 전후방링크로 혼잡이 전파되는 행태를 시간적, 공간적으로 분석하고자 한다. <그림 23>은 전국 고속도로 진출입 램프를 대상으로 링크 단위로 지체·혼잡 경계 속도를 적용하여 혼잡을 판단한 그림이다. 원활한 링크는 , 지체인 링크는 , 혼잡한 링크는 , 자료가 없는 셀은 으로 표현하였다.

<그림 23> 지체·혼잡 링크 표출

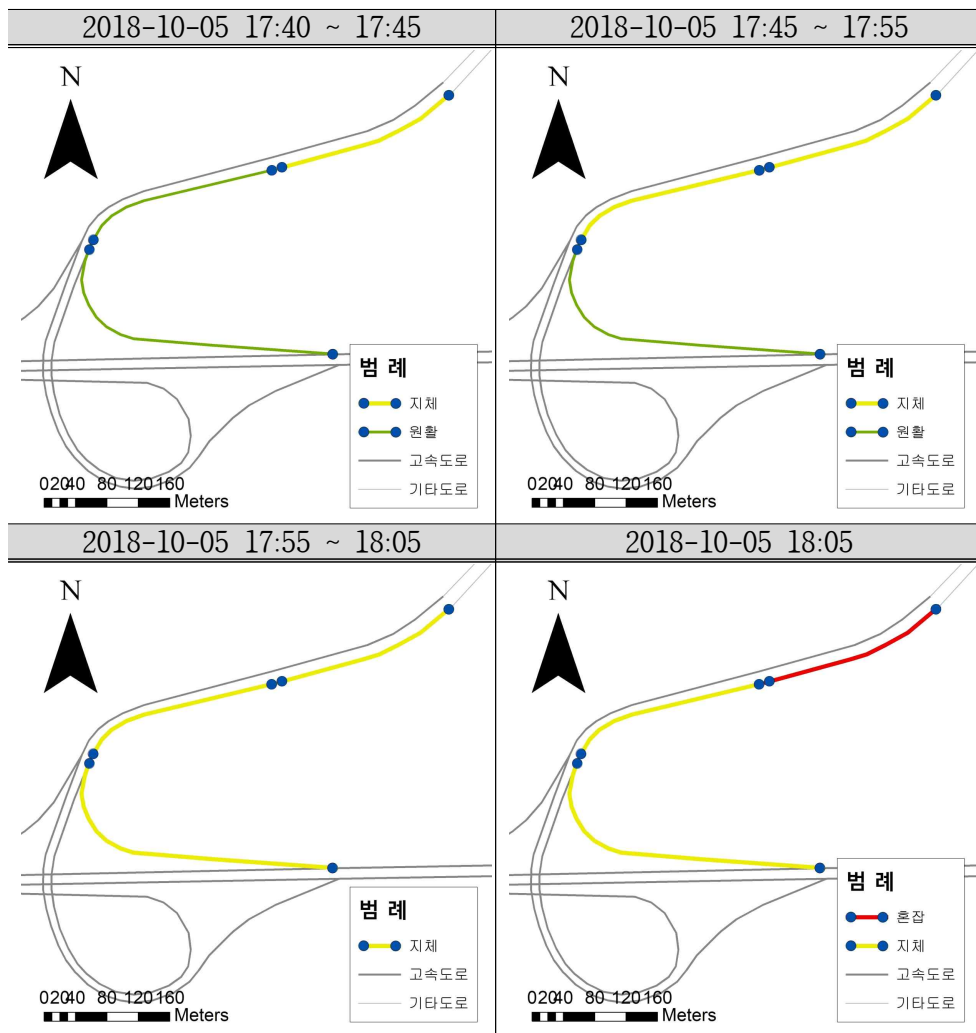


2) 혼잡원인 사례분석

(1) 남구미 IC 상행 진출 사례분석

<그림 24>는 남구미 IC를 상행 진출 경로를 대상으로 2018년 10월 5일 17:40 ~ 18:05까지 지체, 혼잡한 링크가 변화하는 과정을 도면화한 그림이다.

<그림 24> 남구미 IC 상행 진출 혼잡원인 분석



하위도로로 접속되는 하류부 링크에서 지체가 시작되자 혼잡이 상류부로 전파되고 있는 모습이다. 지체와 혼잡이 전파되는 과정을 Matrix 형태로 표현하면 다음 <표 34>와 같다.

<표 34> 남구미 IC 상행 진출 혼잡원인 분석

링크ID	방향	17:30	17:35	17:40	17:45	17:50	17:55	18:00	18:05	18:10	18:15	18:20	18:25
3550141100	상류												
3550140500	↓												
3550142400	하류												
링크ID	방향	18:30	18:35	18:40	18:45	18:50	18:55	19:00	19:05	19:10	19:15	19:20	19:25
3550141100	상류												
3550140500	↓												
3550142400	하류												

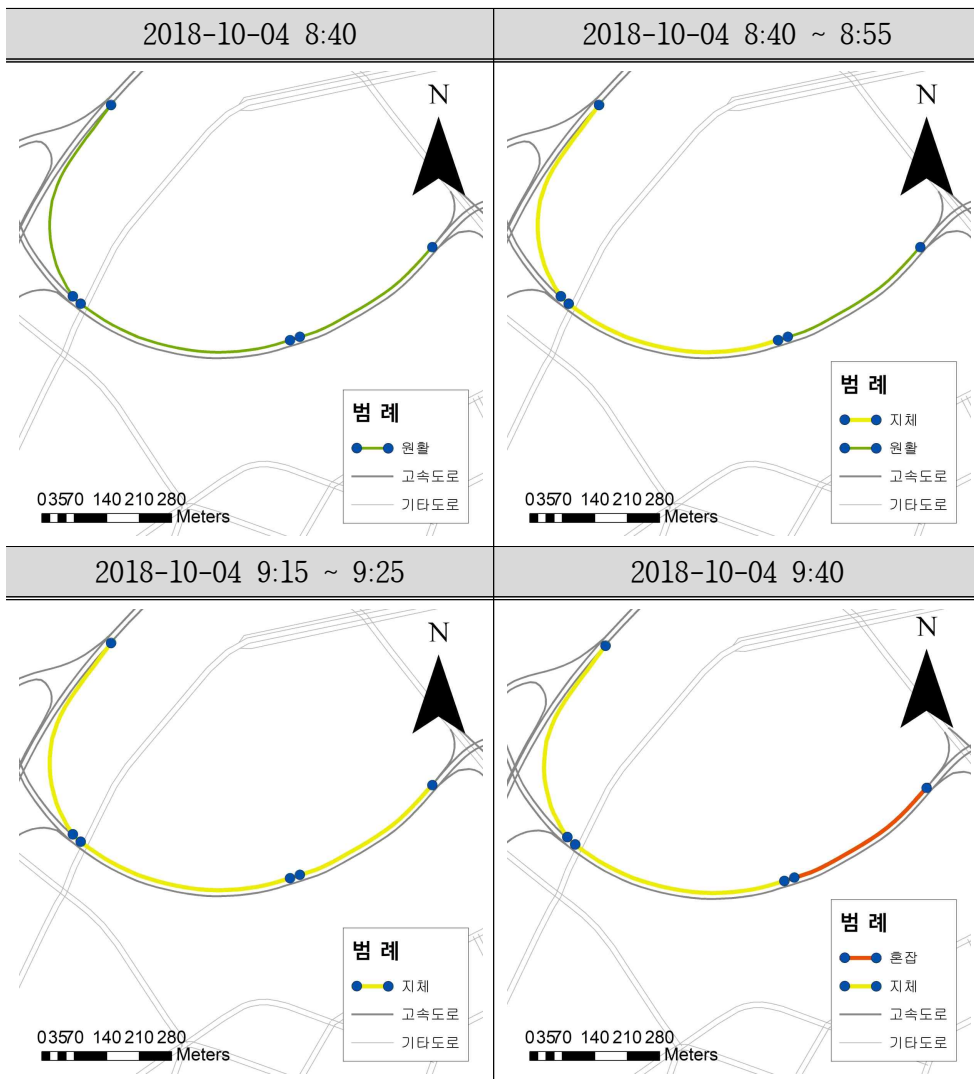
17:40부터 하위도로로 접속되는 하류부 3550142400 링크에서 시작된 지체가 10분 뒤 17:50에 인접한 상류부 3550140500 링크로 전파되고 5분 뒤 17:55에는 보다 상류부인 3550141100 링크로 전파되는 것을 볼 수 있다. 18:05부터는 하류부 3550142400 링크의 지체가 심화되어 소통상황이 혼잡으로 바뀌었고, 상류부부터 순차적으로 원활로 돌아오고 있는 것을 볼 수 있다. 모든 링크가 원활로 소통상황이 바뀐 후 10분 뒤 18:50부터 하류부 3550142400 링크에서 다시 지체가 시작되어 상류부 링크에 전파되고 있는 것을 볼 수 있다.

혼잡원인 분석 결과 위와 같은 사례는 하류부 3550142400 링크가 혼잡의 원인으로 상류부 링크의 혼잡에 영향을 미치는 것으로 분석할 수 있다. 이에 대한 해결책으로 인접한 교차로의 현시조정, 링크 길이 연장, 합류/분류 기하구조 개선 등을 제시할 수 있다.

(2) 남안산 IC 하행 진입 사례분석

<그림 25>는 남안산 IC를 하행 진입 경로를 대상으로 2018년 10월 4일 8:40 ~ 9:40까지 지체, 혼잡한 링크가 변화하는 과정을 도면화한 그림이다.

<그림 25> 남안산 IC 하행 진입 혼잡원인 분석



고속도로로 접속되는 하류부 링크에서 지체가 시작되자 혼잡이 상류부로 전파되고 있는 모습이다. 지체와 혼잡이 전파되는 과정을 Matrix 형태로 표현하면 다음 <표 35>와 같다.

<표 35> 남안산 IC 하행 진입 혼잡원인 분석

링크ID	방향	8:40	8:45	8:50	8:55	9:00	9:05	9:10	9:15	9:20	9:25	9:30	9:35
2170208600	하류												
2170208200	↑												
2170207700	상류												
링크ID	방향	9:40	9:45	9:50	9:55	10:00	10:05	10:10	10:15	10:20	10:25	10:30	10:35
2170208600	하류												
2170208200	↑												
2170207700	상류												

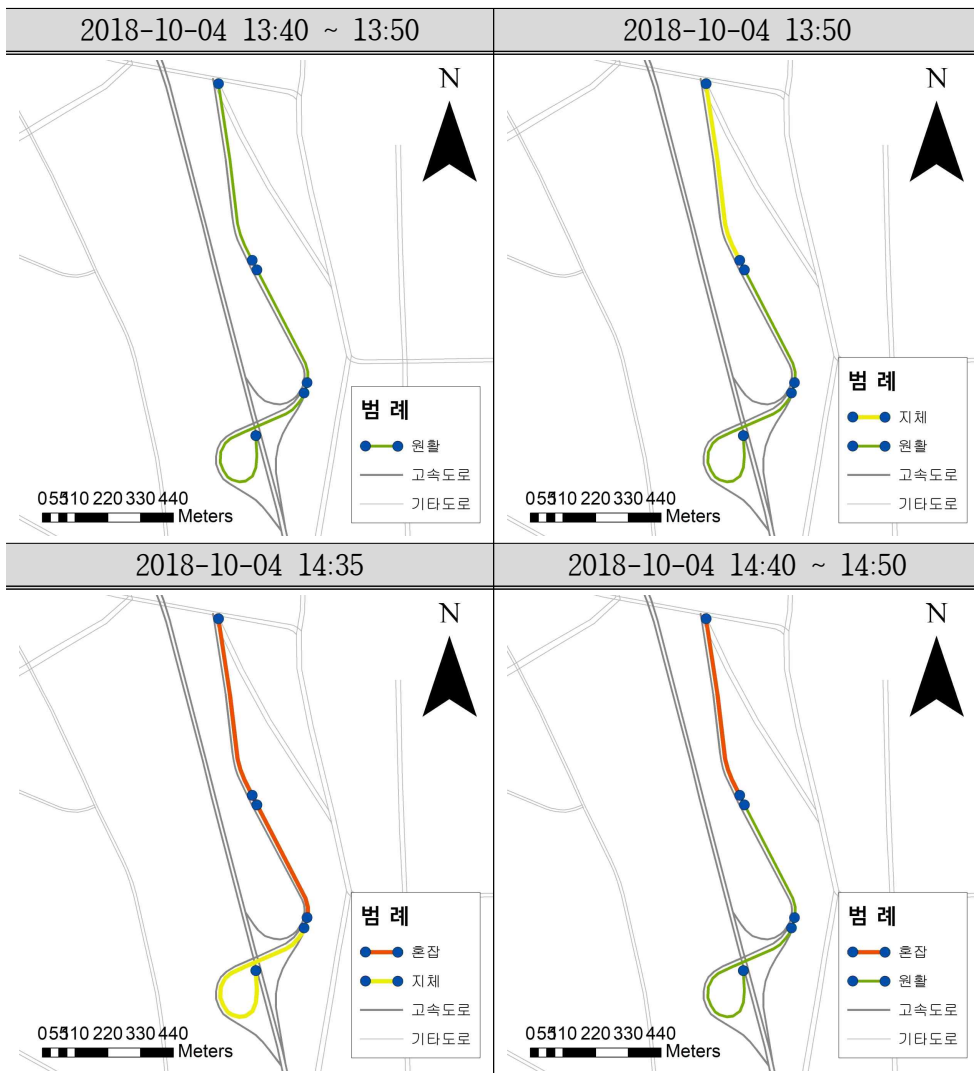
08:45부터 고속도로로 접속되는 하류부 2170208600 링크와 2170208200 링크에서 시작된 혼잡이 09:25부터는 인접한 상류부 2170207700 링크로 전파되고 있는 것을 볼 수 있다. 하류부 2170208600 링크와 2170208200 링크는 지체인 소통상황이 지속되었지만, 하류부 지체의 여파로 인하여 상류부 2170207700 링크는 9:40부터 혼잡이 지속되고 있는 것으로 분석되었다.

혼잡원인 분석 결과 위와 같은 사례는 하류부 2170208600 링크와 2170208200 링크가 혼잡의 원인으로 상류부 링크의 혼잡에 영향을 미치는 것으로 분석할 수 있다. 이에 대한 해결책으로 해당 링크의 길이 연장, 가속차로 연장, 램프미터링 운영 등을 제시할 수 있다.

(3) 구미 IC 하행 진출 사례분석

<그림 26>는 구미 IC를 하행 진출 경로를 대상으로 2018년 10월 4일 13:40 ~ 14:40까지 지체, 혼잡한 링크가 변화하는 과정을 도면화한 그림이다.

<그림 26> 구미 IC 하행 진출 혼잡원인 분석



하위도로로 접속되는 하류부 링크에서 지체가 시작되자 혼잡이 상류부로 전파되고 있는 모습이다. 지체와 혼잡이 전파되는 과정을 Matrix 형태로 표현하면 다음 <표 36>과 같다.

<표 36> 구미 IC 하행 진출 혼잡원인 분석

링크ID	방향	13:40	13:45	13:50	13:55	14:00	14:05	14:10	14:15	14:20	14:25	14:30	14:35
3550125300	상류												
3550128400	↓												
3550122800	하류												
링크ID	방향	14:40	14:45	14:50	14:55	15:00	15:05	15:10	15:15	15:20	15:25	15:30	15:35
3550125300	상류												
3550128400	↓												
3550122800	하류												

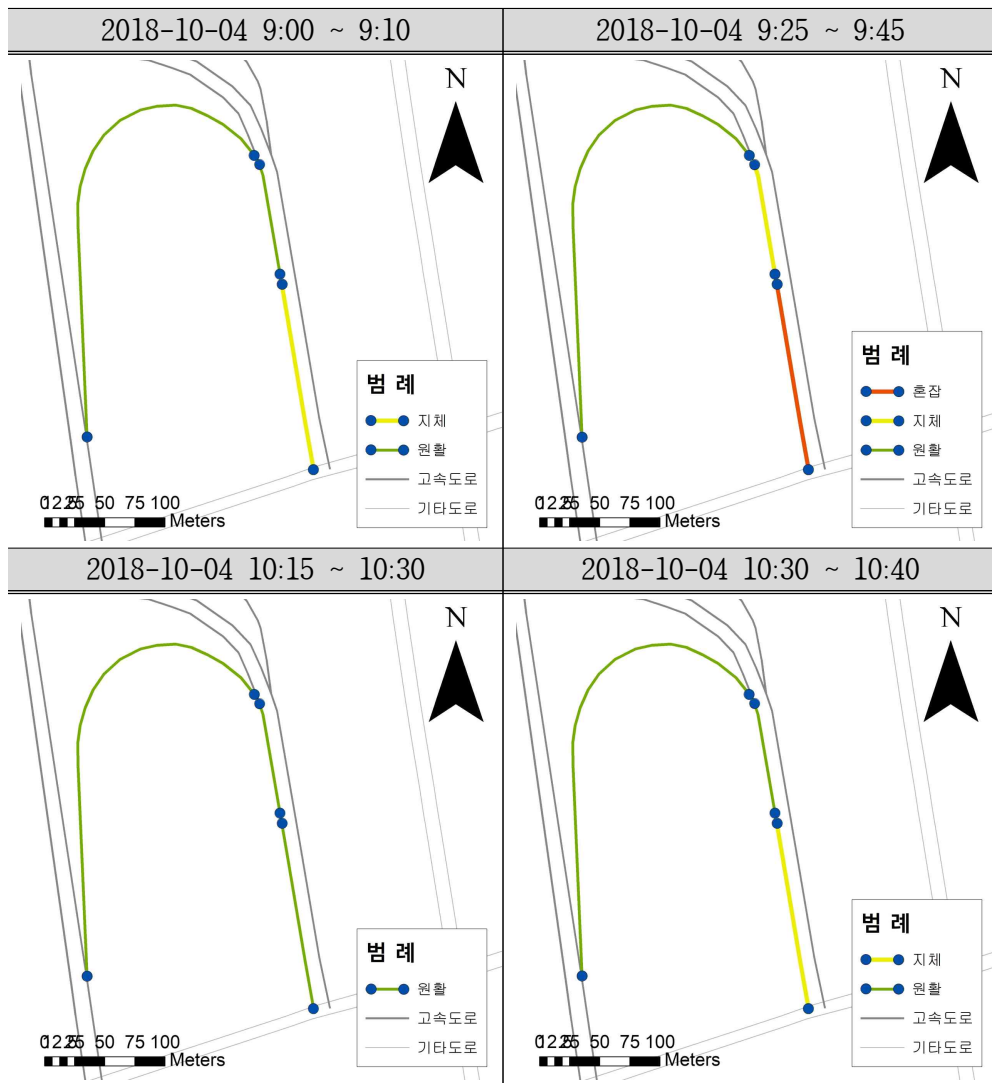
13:50부터 하위도로로 접속되는 하류부 3550122800 링크에서 시작된 지체가 5분 뒤 13:55에는 혼잡으로 소통상황이 더 악화되었고, 5분 뒤 14:00에는 인접한 상류부 3550128400 링크로 전파되었다. 14:35에는 보다 상류부에 위치한 3550125300 링크에도 지체가 전파되는 것을 볼 수 있다. 14:10에는 3550128400 링크가 잠시 혼잡이 해소되었지만, 하류부 3550122800 링크의 지속적인 혼잡으로 인하여 혼잡이 지속적으로 전파되고 있는 것을 볼 수 있다.

혼잡원인 분석 결과 위와 같은 사례는 하류부 3550122800 링크가 혼잡의 원인으로 상류부 링크의 혼잡에 영향을 미치는 것으로 분석할 수 있다. 이에 대한 해결책으로 평면 신호교차로 형태인 현재 교차로를 입체화하거나, 현시조정, 링크 길이 연장, 합류/분류 기하구조 개선 등을 제시할 수 있다.

(4) 창녕 IC 상행 진출 사례분석

<그림 27>은 창녕 IC를 상행 진출 경로를 대상으로 2018년 10월 4일 9:00 ~ 10:40까지 지체, 혼잡한 링크가 변화하는 과정을 도면화한 그림이다.

<그림 27> 창녕 IC 상행 진출 혼잡원인 분석



하위도로로 접속되는 하류부 링크에서 지체가 시작되자 혼잡이 상류부로 전파되고 있는 모습이다. 지체와 혼잡이 전파되는 과정을 Matrix 형태로 표현하면 다음 <표 37>과 같다.

<표 37> 창녕 IC 상행 진출 혼잡원인 분석

링크ID	방향	9:00	9:05	9:10	9:15	9:20	9:25	9:30	9:35	9:40	9:45	9:50	9:55
3910035000	상류												
3910033100	↓												
3910032500	하류												
링크ID	방향	10:00	10:05	10:10	10:15	10:20	10:25	10:30	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55
3910035000	상류												
3910033100	↓												
3910032500	하류												

9:00부터 하위도로로 접속되는 하류부 3910032500 링크에서 시작된 지체가 10분 뒤 9:10에는 혼잡으로 소통상황이 더 악화되었고, 15분 뒤 9:25에는 인접한 상류부 3910033100 링크로 전파되었다. 9:45에는 3910033100 링크도 혼잡으로 소통상황이 악화되었다. 10:20부터 모든 링크에서 지체와 혼잡이 해소되었지만, 10분 뒤 10:30부터 하류부 3910032500 링크에서 다시 지체가 시작되었다. 하지만 창녕 IC의 경우 본선부와 인접한 상류부 3910035000 링크까지는 지체, 혼잡의 영향이 없는 것으로 나타났다.

혼잡원인 분석 결과 위와 같은 사례는 하류부 3910032500 링크가 혼잡의 원인으로 상류부 링크의 혼잡에 영향을 미치는 것으로 분석할 수 있다. 이에 대한 해결책으로 평면 신호교차로 형태인 현재 교차로를 입체화하거나, 현시조정, 링크 길이 연장, 합류/분류 기하구조 개선 등을 제시할 수 있다.

V. 결론

1. 연구의 시사점 및 한계점

1) 연구의 시사점

병목현상으로 인하여 고속도로 지체, 혼잡의 주요 원인이지만, 기존에 연구가 미비하였던 고속도로 진출입 램프에 대하여 혼잡을 판단할 수 있는 지체·혼잡 경계 속도를 고속도로 진출입 램프 경로 단위로 제시하였다. 지체·혼잡 경계 속도 도출을 위하여 혼잡과 지체, 원활 3가지의 통행속도 분포로 구분하고자 가우시안 혼합 모형을 사용하였다. 전국 고속도로 443개 IC의 진출입 램프를 구성하고 있는 1,662개 경로에 대하여 방법론을 적용하여 분석한 결과, 혼잡 경계 속도의 경우 평일은 252개 경로에 대해서, 주말은 210개 경로에 대해서 도출할 수 있었다. 지체 경계 속도의 경우 평일은 982개 경로에 대해서, 주말은 910개 경로에 대해서 도출할 수 있었다.

기존의 소통상황을 판단할 근거가 부족하였던 고속도로 진출입 램프에 대하여 소통상황을 판단할 수 있는 지체·혼잡 경계 속도를 제시하여 지체, 혼잡 관리에 기여할 수 있을 것으로 보인다.

2) 연구의 한계점

2020년을 기준으로 고속도로 진출입 램프에 대해서 구득 가능한 자료는 내비게이션 데이터를 제외하고는 국가교통통합분석 시스템이 유일하다. 최근 연구는 개별 차량 단위의 연구가 대부분이지만, 본 연구에서는 데이터 구득의 한계로 인하여 5분 단위 평균 통행속도 자료를 활용하였다.

지체 또는 혼잡의 군집이 존재하지 않아 지체·혼잡 경계 속도를 도출하지 못한 경로의 경우 소통상황을 판단할 수 있는 기준이 없다. 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

2. 연구의 활용방안

다양한 기하구조와 제한속도로 일괄적인 혼잡판단 속도를 적용할 수 없는 고속도로 진출입 램프에 대하여 지체·혼잡 경계 속도를 적용하여 혼잡 여부를 판단할 수 있다. 향후 혼잡 관리를 위해 지체·혼잡 경계 속도를 현장에 적용하여 혼잡을 판단하고 관리할 수 있도록 평일, 주말 단위로 지체·혼잡 경계 속도를 도출하였다.

도출된 지체·혼잡 경계 속도를 활용하여 혼잡원인 분석을 한다면 본 연구에서 사례분석과 같이 혼잡의 원인을 파악하고 해결책을 제시할 수 있다.

3. 향후 과제

본 연구에서는 2018년 10월 한 달의 5분 단위 평균 통행속도 데이터를 활용하여 분석하였다. 향후 내비게이션 데이터 등 개별 차량 단위 데이터를 구축하여, 더욱 신뢰성 있는 진출입 램프에 관한 데이터로 분석해보고자 한다. 추가적으로 경로 속성정보 자료를 활용하여 지체·혼잡 경계 속도를 도출하지 못한 경로의 경우 소통상황을 판단할 수 있는 기준을 제시해보고자 한다.

또한, 연구에서 사용한 가우시안 혼합 모형의 경우 적용된 알고리즘에만 의존하여 군집을 분류하기 때문에 특정 경로에서 혼잡 경계 속도가 63km/h로 도출되어 경계 속도 값이 현실과 부합하는지 판단할 수 없었다. 이는 모형의 한계점으로 보인다. 향후 가우시안 혼합 모형 외에 선행연구에서 사용하였던, X-Means, K-Means, C-Means 등의 클러스터링 기법을 적용하여 지체·혼잡 경계 속도를 도출하여, 정확도를 비교해보고 보다 합리적인 지체·혼잡 경계 속도를 도출하는 것을 연구를 향후 과제로 남긴다.

■ 참고문헌

- 국토교통부(2013), 「도로용량편람」, 세종: 국토교통부
- 국토교통부(2012), 교통혼잡관리시스템(CMS) 도입방안 연구, 국토교통부 연구보고서
- 국토교통부(2017), 주요 간선도로 접속부 지·정체 개선방안 마련 연구, 국토교통부 연구보고서
- 김동현, 황기연. 운영(2019), 심층인공신경망(DNN)과 다각도 상황 정보 기반의 서울시 도로 링크별 교통 혼잡도 예측, 한국 ITS학회논문지, 18(4): 44-57.
- 김상구, 김근덕(2011), 고속도로 합류부 교통와해 특성 및 확률모형 개발, 교통연구, 18(3): 2-16.
- 김상구, 김영춘(2006), 시공간적 관점에서 차로별 고속도로 합류구간 전 이교통류 특성 분석, 대한교통학회 학술대회지, 53: 421-430.
- 김성수(2009), 자동화 K-평균 군집방법 및 R 구현, 응용통계연구, 22(4): 723-733.
- 김진태, 조용빈(2018), 교통소통 정보기반 신호교차로 운영평가를 위한 혼잡강도 지표 임계값 연구, 한국도로학회 논문집, 20(3): 85-92.
- 나소정(2000), 교통혼잡전이 현상에 관한 연구, 홍익대학교 대학원 석사 학위논문.
- 복기찬, 이승준, 최윤희, 강정규, 이승환(2009), 고속도로 소통상태지수 개발에 관한 연구, 대한교통학회지, 27(5): 85-95.
- 이상건, 박진호(1997), 도로교통혼잡지표 개발에 관한 연구, 국토개발연구원 연구보고서.
- 이진수(2018), 실시간 고속도로 혼잡판단 지표 및 알고리즘 구축, 서울 대학교 환경대학원 석사학위 논문.

- 장현호, 이승봉, 한동희, 이영인(2017), 밀도기반 비집계 접근법을 이용한 구간통행시간 추정 방법론, 한국ITS학회논문지, 16(5): 134-143.
- 정희진, 윤진수, 배상훈(2017), 순환인공신경망(RNN)을 이용한 대도시 도심부 교통혼잡 예측, 한국ITS학회논문지, 16(6): 67-78.
- 한국도로공사(2008), 고속도로 소통상황 판정기준 정립연구, 한국도로공사 연구보고서
- 한학용(2006), 「패턴인식 개론」, 서울: 한빛아카데미
- Azimi, M. & Zhang, Y.(2010), Categorizing Freeway Flow Conditions by Using Clustering Methods, *Journal of the Transportation Research Board*, 2173, 105-114.
- Bishop, C. M.(2006), *Pattern Recognition and Machine Learning*, New York: Springer-Verlag.
- Falcochchio, J. C. & Levinson, H. S.(2015), *Road Traffic Congestion: A Concise Guide*, Cham: Springer.
- FHWA(2019), *Decision Support Framework and Parameters for Dynamic Part-Time Shoulder Use*, Washington, DC: FHWA
- Fraley, C. & Raftery, A. E.(1998), How Many Clusters? Which Clustering Method? Answers Via Model-Based Cluster Analysis, *The Computer Journal*, 41(8), 578-588.
- Jun, J.(2010), Understanding the Variability of Speed Distributions under Mixed Traffic Conditions Caused by Holiday Traffic. *Transportation Research Part C*, 18(4), 559-610.
- Kazil, J. & Jarmu,. K.(2016), *Data Wrangling with Python*, Sebastopol: O'Reilly Media

- Ko, J. & Guensler, R.(2005), Characterization of Congestion Based on Speed Distribution: A Statistical Approach Using Gaussian Mixture Model. *CD-ROM, Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, DC.
- Kocatepe, A., Ozguven, E. E., Vanli, A. & Moses, R. (2017), Analysis of Speed Patterns on Inter-urban Parallel Highways: A Case Study in the Southeast Florida, *Transportation Research Procedia*, 22, 479-488.
- Saeedmanesh, M. & Geroliminis, N.(2017), Dynamic clustering and propagation of congestion in heterogeneously congested urban traffic networks, *Transportation Research Procedia*, 23, 962-979.
- TRB,(2010), 「Highway Capacity Manual」, Washington, D.C: TRB
- Yeung, K. Y., Fraley, C., Murua, A., Raftery, A. E. & Ruzzo, W. L.(2001), Model-based clustering and data transformations for gene expression data, *Bioinformatics*, 17(10), 977-987.
- 고속도로 공공데이터 포털, <http://data.ex.co.kr/>
- 네이버 지도, <https://map.naver.com/>
- 카카오맵, <https://map.kakao.com/>
- 한국도로공사 홈페이지, <http://www.ex.co.kr/>
- e-나라지표, <http://www.index.go.kr/>
- ITS표준노드링크, <http://nodelink.its.go.kr/>

Abstract

Estimation of Delay and Congestion Threshold Speed in Highway Lamps and Cause Analysis of Congestion

Taeyang Yang

Transportation Studies

Department of Environmental Planning

The Graduate School of Environmental Studies

Seoul National University

The congestion of highway ramps in highway mains is mainly caused by bottlenecks. To ease congestion, congestion management of highway ramps is necessary, but there is a lack of clear evidence to determine traffic congestion. In the case of highway mains, the properties such as speed limits and road lines are similar, so there is no big problem with applying one standard. However, in the case of highway ramps, it is difficult to apply a collective standard because they have various properties. Therefore, the purpose of this study is to derive the delay and congestion

threshold speed for congestion management for the route that constitutes highway ramps.

There are ways to use indicators to determine congestion and delay, and to classify different traffic flows through clustering techniques. In this study, the Gaussian mixed model was used to classify into three clusters: congestion, delay and smoothness. Studies related to the existing Gaussian mixed model suggested that, as a threshold, there is a limit to the number of clusters defined by the researchers that may lead to poor explanatory power. In this study, BIC was used to find the most optimal number and to derive a model. The range of cluster numbers was set at 1 to 7 on weekdays and 1 to 6 on weekends through preliminary analysis.

The criteria for dividing congestion, delay and smoothness for multiple Gaussian distributions were the use of TPI. The TPI is an indicator that can be divided into smooth if the TPI value is less than 0.4 and congestion if it is greater than 0.7 by calculating how much the current average speed of traffic is relative to the free speed.

When groups are divided into three types of traffic performance by TPI value, the question arises of which clusters are representative of traffic performance if there are several clusters within traffic performance enterprises. In this study, the mixing coefficients of each model were used to combine them into one model.

In this study, the threshold speed is derived by separating weekdays and weekends when the distribution of traffic speed is different. The intersection of congestion and delay, congestion and smoothness clusters is defined as the congestion threshold speed, and the intersection of delay and smoothness clusters is defined as

the delay threshold speed. As a result of application, the congestion threshold speed was derived for 252 routes on weekdays and 210 routes on weekends, while the delay threshold speed was derived for 982 routes on weekdays and 910 routes on weekends.

Of the 462 routes threshold speeds on weekdays and weekends, 145 routes were found to have been derived for both weekdays and weekends, with many different routes being congested on weekdays and weekends. For the delay threshold speed, 742 of the 1,892 routes, showing no significant difference on weekdays and weekends compared to the congestion threshold speed.

The cause of congestion was investigated through case analysis by applying the derived delay and congestion threshold speed, and in the case of the entry route, the congestion of highway mains was sometimes caused by the congestion of highway lamps.

In this study, it is meaningful that the speed of the delay and congestion threshold was derived to determine the traffic performance for highway lamps that are blamed for the congestion at the main highway. However, due to the limitations of data acquisition, it leaves a limitation that the criteria cannot be provided for the use of the average traffic speed data in five minutes, not for individual vehicle data, and for routes without delays or congestion.

keywords : Highway Ramp, Traffic Congestion, Threshold Speed, Clustering

Student Number : 2018-28701